

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2011

ÁTILA FELTER

PROJETO DE UM DISPOSITIVO PARA PRENSAR BOBINAS POLARES
DE PÓLOS SALIENTES PARA HIDROGERADORES.

Trabalho de Graduação apresentado
ao Conselho de Curso de Graduação
em Engenharia Mecânica da
Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista,
como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Graduação
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Geraldo Trani Brandão

Guaratinguetá
2011

F325p	Átila Felter Projeto de um dispositivo para prensar bobinas polares de pólos salientes para hidrogeradores / Átila Felter – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 44 f : il. Bibliografia: f. 43-44 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. José Geraldo Trani Brandão 1. Bobinas I. Título CDU 621.3.046
-------	--

**PROJETO DE UM DISPOSITIVO PARA PRENSAR BOBINAS POLARES DE
PÓLOS SALIENTES PARA HIDROGERADORES.**

ÁTILA FELTER

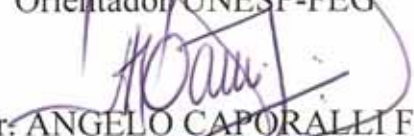
**ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

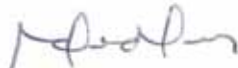
**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ GERALDO TRANI BRANDÃO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. ANGELO CAPORALLI FILHO
UNESP-FEG


Prof. Dr. MAURO PEDRO PERES
UNESP/FEG

Dezembro de 2011

de um modo especial à minha namorada Renata Andrade Nobre e
aos meus pais Marcos Felter e Cleide Maria Felter que sempre me
apoiam nesta longa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, pela saúde e pela família.

Agradeço também aos meus pais Marcos e Cleide que sempre me apoiaram e me mostraram valores essenciais, os quais me permitiram trilhar por caminhos corretos.

Sou grato à minha namorada Renata que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos, oferecendo um ombro para um desabafo e entendendo as ausências para estudar nos finais de semana ou a nossa distância devido à rotina intensa.

Aos meus irmãos Ícaro e Janaina.

Ao professor Brandão que indicou a direção a seguir durante este trabalho, com humildade e perseverança, atributos dos mestres.

Aos amigos da turma, que sempre estiveram presentes para conversar e para compartilhar opiniões, risadas, derrotas e vitórias.

A todos os amigos e familiares que também acreditaram em mim.

“Aquilo que você mais sabe ensinar é o que você
mais precisa aprender”

Richard Bach

FELTER, A. **Projeto de um dispositivo para prensar bobinas polares de pólos salientes para hidrogeradores**. 2011. 44 f. Trabalho (Graduação) – Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

A crescente demanda por produtividade e qualidade nas empresas tem convergido para um ponto comum: a redução de custos. Neste contexto o presente trabalho objetiva o desenvolvimento de uma prensa mecânica que tem por finalidade prensar bobinas polares de hidrogeradores com pólos salientes em campo, facilitando a montagem dos pólos na obra, principalmente em reformas de hidrogeradores, reduzindo de forma significativa os custos de transporte tendo como comparativo a prensagem das bobinas polares em uma prensa hidráulica.

Pensando na segurança assim como na redução de custos, foi feito um estudo dos materiais a serem utilizados assim como foi aplicada uma metodologia de cálculo para a escolha correta do coeficiente de segurança a ser utilizado no dispositivo.

Através de cálculos mecânicos foram dimensionados os itens críticos do dispositivo como o diâmetro dos tirantes assim como a espessura mínima que a base do dispositivo deverá ter para que a mesma não se rompa na região roscada por cisalhamento ao se aplicar a carga total de tração nos tirantes na execução da prensagem.

Todo o carregamento de compressão do dispositivo se dará através da aplicação de torque nas porcas dos tirantes, desta forma foi definido através de cálculos o torque requerido para cada porca para que assim se possa atingir a pressão específica especificada no projeto.

A modelagem do dispositivo foi feita utilizando o programa **INVENTOR™** em conjunto com o programa **ANSYS™**. Estes programas permitiram criar desenhos em três dimensões, simulação de montagens e análise de tensão nos componentes do dispositivo.

PALAVRAS-CHAVE: Dispositivo, Prensa, Hidrogerador, Bobinas.

FELTER, A. **Design of a device for pressing coils protruding polar hydrogenerators poles.** 2011. 44 pages. Paper (Graduation) – Mechanical Engineering, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

The increasing demand for productivity and quality in companies has converged to a common point: reducing costs. In this context the present work aims at the development of a mechanical press which is designed for pressing polar hydrogenerators coils with salient pole in field facilitating the assembly of the poles in the plant, as well as reforms especially in hydrogenerators, reducing significantly the transport costs.

With security in mind as well as reduced costs, a study was made of the materials to be used as it was applied a methodology for calculating the correct choice of safety factor to be used in the device.

Through mechanical calculations were dimensioned critical items of the device as the diameter of the rods as well as the minimum thickness of the base of the device must have so that it does not break threaded shear in the region by applying the total load of traction on the risers implementation of the pressing.

All compression loading device will be through the application of torque on the nuts of bolts in this way was defined by calculations the required torque for each nut so that you can reach the pressure specified in the design specifies.

The modeling of the device was made using the **INVENTOR™** program in conjunction with the program **ANSYS™**. These programs have created designs in three dimensions, assembly and simulation of stress analysis in components of the device.

KEYWORDS: Device, Press, Hydrogenerator, Coils.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: FOTO DA ARMADURA, CARÇAÇA E ENROLAMENTOS DE UM GERADOR.....	10
FIGURA 2: FOTO DE UMA RODA POLAR DE UMA MÁQUINA DE PÓLOS SALIENTES.....	11
FIGURA 3: PÓLOS COM ENCAIXE TIPO “CABEÇA DE MARTELO”.	12
FIGURA 4: FOTO DA INTERLIGAÇÃO DOS PÓLOS.	13
FIGURA 5: FOTO DOS ANÉIS COLETORES E ESCOVAS.....	13
FIGURA 6: FOTO DE UM ROTOR COM ENROLAMENTO AMORTECEDOR	14
FIGURA 7: FOTO EM DETALHE DO ENROLAMENTO AMORTECEDOR.	15
FIGURA 8: FOTO DO PROCESSO DE ISOLAÇÃO ENTRE ESPIRAS.	16
FIGURA 9: FOTO DA PRENSA HIDRÁULICA.	16
FIGURA 10: FOTO DO NÚCLEO DO PÓLO.	17
FIGURA 11: FOTO DA PLACA DE PRESSÃO.	17
FIGURA 12: FOTO DA CHAPA DO NÚCLEO DO PÓLO.....	18
FIGURA 13: BOBINA POLAR	26
FIGURA 14: VISTA EM CORTE DO DISPOSITIVO.....	27
FIGURA 15: VISTA DE PLANTA DO DISPOSITIVO.	27
FIGURA 16: MOLA PRATO DIN 2093 SÉRIE A.	34
FIGURA 17: PACOTE DE MOLAS PRATO.	36
FIGURA 18: DISPOSITIVO SEM A BOBINA POLAR	37
FIGURA 19: DISPOSITIVO COM A BOBINA POLAR	37
FIGURA 20: TRANSFERINDO O MODELO DO TIRANTE DO INVENTOR PARA O ANSYS™	38
FIGURA 21: GERANDO A MALHA PARA CÁLCULO DO TIRANTE EM ANSYS™	38
FIGURA 22: RESULTADO DO CALCULO DE TENSÕES GERADO PELO ANSYS™	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	PROPOSTA	19
3	METODOLOGIA	20
3.1	METODOLOGIA DE UTILIZAÇÃO DO INVENTOR™	20
4	ANTEPROJETO	21
4.1	ESCOLHA DO COEFICIENTE DE SEGURANÇA	21
4.2	SELEÇÃO DO MATERIAL	23
4.2.1	<i>Base</i>	23
4.2.2	<i>Apoio inferior</i>	23
4.2.3	<i>Apoio Superior</i>	23
4.2.4	<i>Suporte para alinhamento</i>	24
4.2.5	<i>Viga</i>	24
4.2.6	<i>Pacote de molas prato</i>	24
4.2.7	<i>Tirantes</i>	24
4.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS SELECIONADOS	25
4.3.1	<i>ASTM A36</i>	25
4.3.2	<i>SAE 4140 (barra de aço redonda trefilada)</i>	25
4.3.3	<i>SAE 4140 B (barra redonda de aço laminada e beneficiada)</i>	25
4.3.4	<i>Aço mola ABNT 6150 (50 Cr V4)</i>	25
4.4	CONCEPÇÃO GERAL DO DISPOSITIVO DE PRENSAR BOBINAS POLARES	26
5	PROJETO DO DISPOSITIVO	28
5.1	DEFININDO O CARREGAMENTO APLICADO NA BOBINA POLAR	28
5.2	DIMENSIONAMENTO DOS TIRANTES	29
5.3	DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA MÍNIMA DA BASE.	31
5.4	DEFININDO O TORQUE DE APERTO DAS PORCAS DOS TIRANTES	32
5.5	DEFININDO O CONJUNTO DE MOLAS PRATO ADEQUADO PARA O PROJETO	33
5.6	MODELAGEM DO DISPOSITIVO EM INVENTOR™	37
6	ANÁLISE DE TENSÃO DO TIRANTE EM ANSYS™	38
7	COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS	40
7.1	PROCESSO DE PRENSAGEM UTILIZANDO PRENSA HIDRÁULICA	40
7.2	PROCESSO DE PRENSAGEM UTILIZANDO O DISPOSITIVO.	40
7.3	VANTAGENS E DESVANTAGENS.	41
8	CONCLUSÕES	42
8.1	SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.	42
9	REFERÊNCIAS	43
10	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	44

1 INTRODUÇÃO

Máquinas síncronas são conversores rotativos que transformam energia mecânica em elétrica, ou vice versa, utilizando-se dos fenômenos da indução e conjugados eletromagnéticos. Assim, podem exercer uma ação motora ou geradora. Este trabalho terá como foco as máquinas síncronas geradoras, dando uma atenção especial aos pólos salientes do rotor do hidrogerador.

Os hidrogeradores, de uma forma geral, são constituídos de um circuito magnético o qual é responsável pela condução do fluxo magnético, de enrolamentos de armadura (induzido) nos quais são induzidas as tensões, componentes mecânicos os quais podem ser fixos, para suportar e proteger as partes eletromagnéticas, e rotativas, para a transmissão de energia e de isolamento elétrico que é composto de isolantes sólidos (como papel e vernizes) e são responsáveis pelo nível de tensão admissível entre as diversas partes da máquina. As partes fixas são denominadas genericamente de estator e as móveis de rotor.

Fazem parte do estator a carcaça da máquina, os enrolamentos, o núcleo magnético da armadura, conforme apresentado na figura 1, os mancais, e eventualmente as escovas para alimentação de campo.

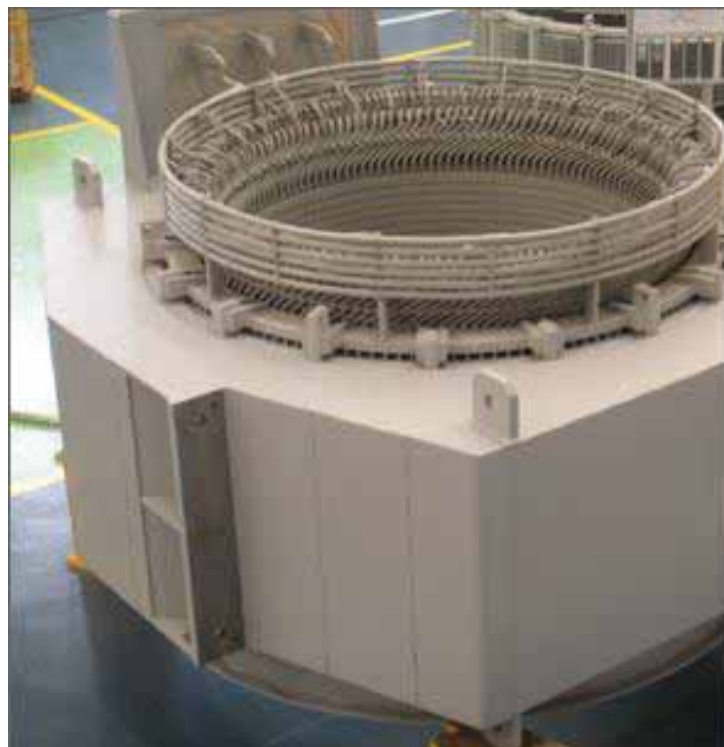


Figura 1: Foto da armadura, carcaça e enrolamentos de um gerador.

Fazem parte do rotor o cubo do rotor, a aranha ou anel magnético, os pólos, o eixo, os enrolamentos de campo e os enrolamentos amortecedores conforme apresentado na figura 2.

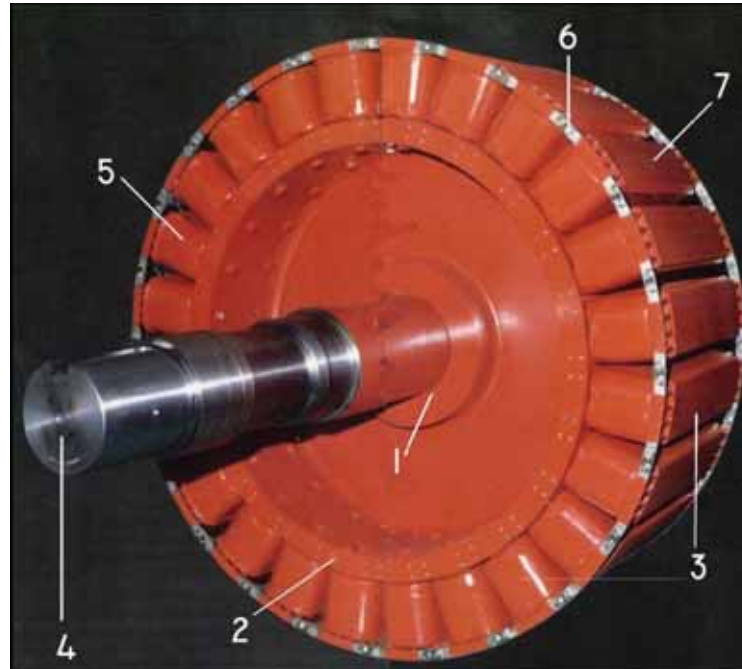


Figura 2: Foto de uma roda polar de uma máquina de pólos salientes. 1 - Cubo do rotor; 2 – Anel magnético; 3 - Pólos; 4 - Eixo; 5 - Enrolamento de campo; 6 e 7 – Enrolamento amortecedor.

O anel magnético pode ser sólido ou constituído de chapas lisas de aço empilhadas e aparafusadas juntas de modo a formar uma estrutura sólida, tal que o comprimento radial do entreferro (distância livre entre o rotor e o estator) varie uniforme e consistentemente com o aumento ou diminuição da velocidade do rotor na faixa de zero até a velocidade de disparo.

O eixo, normalmente, é de aço forjado, usinado e tratado termicamente.

Os pólos podem ser sólidos ou laminados dependendo dos esforços mecânicos e o tipo de operação da máquina.

Os pólos sólidos apresentam uma baixa resistência elétrica e assim, proporcionam a circulação de correntes parasitas. Pólos laminados limitam as correntes parasitas.

O método de fixação dos pólos ao anel magnético depende dos esforços causados pela força centrífuga desenvolvida em sobrevelocidade máxima ou na velocidade de disparo.

Para máquinas de médio e grande porte é comum usar-se pólos que podem ser retirados axialmente (na direção do eixo) e que são encaixados em rasgos no anel magnético denominados no jargão técnico por “cabeça de martelo” e “rabo de andorinha”.

A figura 3 apresenta um corte transversal de um rotor de pólos salientes onde sua fixação é do tipo “cabeça de martelo”.

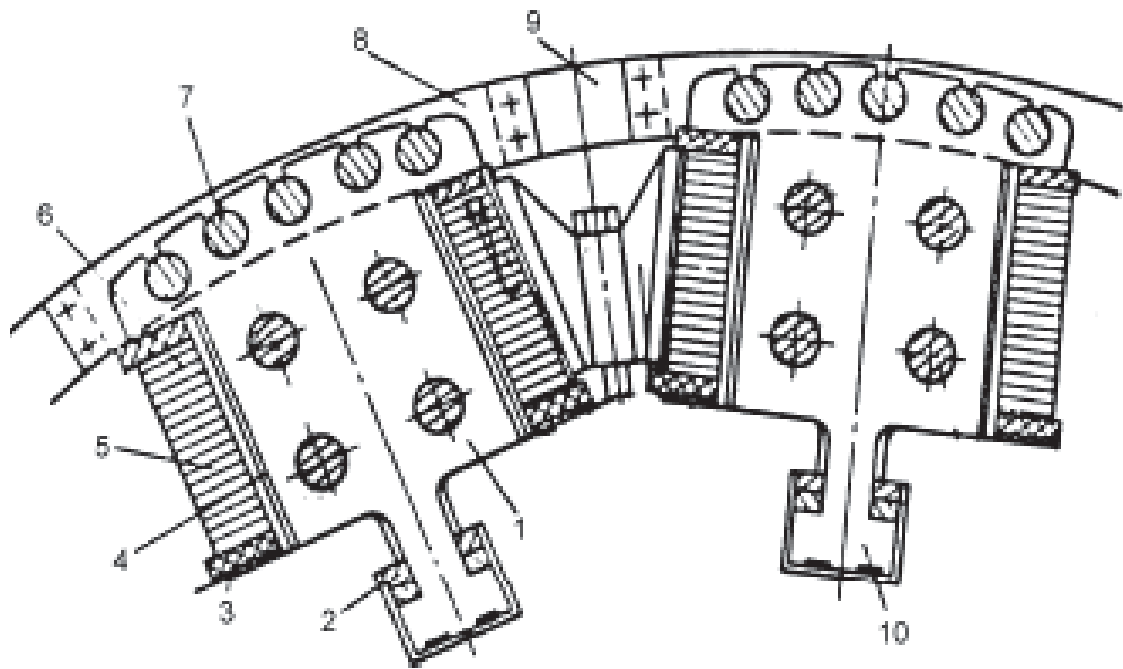


Figura 3: Pólos com encaixe tipo “Cabeça de martelo”. 1 – Núcleo do pólo; 2 – Cunhas; 3 – Colar isolante; 4 – Isolamento entre o núcleo do pólo e a bobina polar; 5 – Bobina polar; 6 – Isolamento entre as espiras condutoras da bobina polar; 7 e 8 enrolamento amortecedor; 9 – Barra de interligação entre enrolamentos amortecedores; 10 – Encaixe tipo cabeça de martelo

As bobinas de cada pólo são interligadas entre si de tal forma que haja um norte e um sul intercalados conforme apresentado na figura 4. O conjunto todo compõe o enrolamento de campo, o qual é conectado a anéis coletores os quais irão excitar a máquina através de corrente contínua conforme apresentado na figura 5.



Figura 4: Foto da interligação dos Pólos.

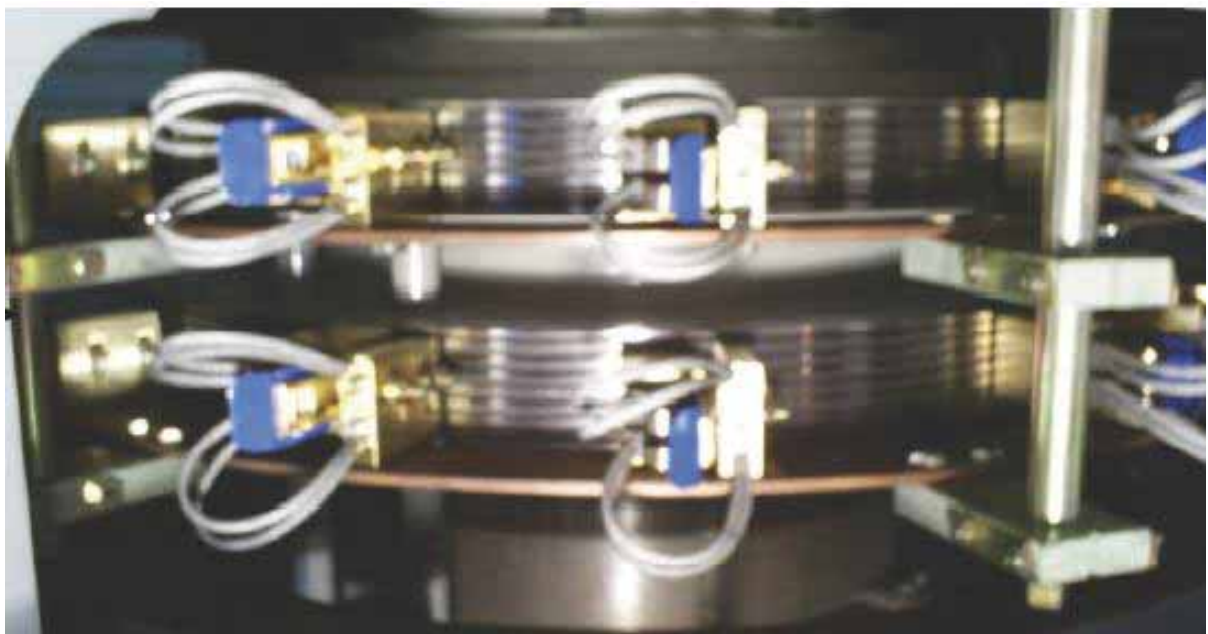


Figura 5: Foto dos anéis coletores e escovas

É prática comum prover os geradores acionados por turbinas hidráulicas com enrolamento amortecedor.

Ele oferece as seguintes características operativas:

- Redução das sobretensões induzidas no enrolamento do campo pelos surtos de tensão que atingem o enrolamento do estator e pelas condições desequilibradas no estator, tais como falha em uma bobina;
- Redução das sobretensões no enrolamento do estator causadas por falhas desequilibradas na máquina, particularmente em máquinas ligadas a capacitâncias, tais como linhas de transmissão;
- Redução efetiva na oscilação da saída do gerador ocasionalmente experimentada em máquinas ligadas às suas cargas através de circuitos com alta resistência;
- Pequena ajuda à estabilidade do sistema pela redução da magnitude das oscilações do rotor da máquina;
- Mantém a operação com carga assimétrica, se necessário;

As várias barras do enrolamento amortecedor (cilíndricas ou perfiladas) são conectadas entre si, formando o que se denomina por grade conforme apresentado nas figuras 6 e 7. As grades podem ser descontínuas ou contínuas.



Figura 6: Foto de um rotor com enrolamento amortecedor em grade contínua.



Figura 7: Foto em detalhe do enrolamento amortecedor.

As grades descontínuas são mais utilizadas devido a sua simplicidade mecânica e por permitir a remoção do campo de um pólo só, sem as interferências que ocorreriam caso a grade fosse contínua.

Para o processo de fabricação dos pólos do hidrogerador, primeiro deve-se fabricar a bobina polar que é composta por barras de cobre retangulares, as quais são fornecidas pré-cortadas.

Assim que as barras são fornecidas começa o processo de fabricação da bobina. As barras de cobre começam a ser unidas por um processo de brasagem para formar as espiras polares.

Após a formação das espiras, as mesmas devem ser isoladas entre si para que a bobina não feche curto-circuito. Esta isolamento é feita com papel nomex resinado de classe F conforme apresentado na figura 8.



Figura 8: Foto do processo de isolamento entre espiras.

Com todas as espiras isoladas entre si, elas devem ser prensadas e aquecidas ao mesmo tempo. Esta etapa de fabricação é umas das mais importantes, pois é ela quem vai garantir a isolação entre as espiras e dará maior rigidez à bobina polar.

A bobina deve ser prensada a uma pressão especifica de 50 kgf/cm^2 conforme apresentado na figura 9 e deve ser submetida a um ciclo térmico pré-estabelecido para que haja a cura da resina.



Figura 9: Foto da Prensa Hidráulica.

Assim que se termina o processo de prensagem e cura da bobina, deve ser retirado o excesso de papel nomex que normalmente fica nas laterais da bobina. Isto é feito para facilitar no processo de montagem da bobina polar com o núcleo do pólo.

O núcleo do pólo é composto de placa de pressão, chapa do núcleo do pólo, tirantes, barras de amortecimento, segmentos anel amortecimento e porcas. A figura 10 apresenta uma foto do núcleo do pólo.



Figura 10: Foto do núcleo do pólo.

A placa de pressão é normalmente fundida sofrendo posterior usinagem conforme apresentado na figura 11. Sua principal função é a de compactar o núcleo do pólo através dos tirantes e das porcas.



Figura 11: Foto da placa de pressão.

A chapa do núcleo do pólo consiste em chapas finas de aço laminadas as quais variam suas espessuras de 1 a 4,5mm conforme apresentado na figura 12. Estas serão

empilhadas para se obter o comprimento do núcleo desejado sendo as mesmas cortadas a laser para se obter o perfil desejado.

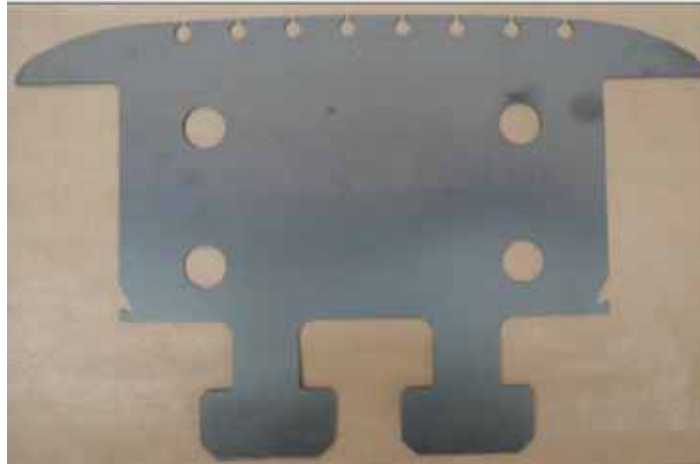


Figura 12: Foto da chapa do núcleo do pólo.

Os tirantes e as porcas têm a função de manter as chapas do núcleo do pólo compactadas, eles são normalmente fabricados com material SAE 4140 que tem alta resistência à tração.

As barras de amortecimento assim como os anéis de amortecimento são fabricadas em cobre pelo fato do mesmo facilitar a passagem de corrente elétrica.

2 PROPOSTA

A proposta deste trabalho é analisar uma forma viável de se prensar bobinas polares em campo facilitando a montagem dos pólos na obra, principalmente em reformas de hidrogeradores, tendo como parâmetro a prensagem das bobinas polares em uma prensa hidráulica.

Este trabalho apresenta uma alternativa viável para a substituição da prensa hidráulica por uma prensa mecânica para a prensagem das bobinas polares, tendo em mente que o foco da prensa mecânica é ter mobilidade para que se possa prensar as bobinas polares na obra, e o ciclo térmico para a cura da bobina se daria através de um forno elétrico.

3 METODOLOGIA

Ao se identificar a necessidade de se criar uma alternativa para prensar as bobinas polares, foi feito um estudo de um dispositivo o qual deveria ter como principal característica a fácil mobilidade, tendo como foco prensar as bobinas polares na obra.

Após o estudo, é feita uma modelagem do dispositivo em questão; neste caso foi utilizado o programa **INVENTOR™** (programa para modelagem de sólidos). Neste todos os componentes do dispositivo foram modelados com as medidas preliminares resultantes do estudo tendo como base as dimensões da bobina polar que se deseja prensar.

Com o modelo do dispositivo pronto, foi possível uma melhor visualização do produto assim podendo refinar o estudo e identificar os componentes críticos que deverão ser dimensionados através de cálculos mecânicos. Neste caso, foi identificado que os itens críticos do projeto serão os tirantes os quais irão sofrer esforço de tração.

3.1 Metodologia de utilização do **INVENTOR™**

A modelagem de produtos em ambientes 3D elimina muitos erros de construção, pois além de modelar cada elemento é possível a montagem dos componentes e simulação do seu movimento, possibilitando a identificação de interferência entre elementos. Esta simulação reduz os custos futuros que seriam gerados com esses problemas.

O programa **INVENTOR™** transforma a análise de um projeto simples. A simulação virtual oferece uma forte ferramenta para a análise de projetos, permitindo a verificação e a validação desses, sem nenhum custo inicial, admitindo alteração das dimensões de forma muito fácil.

4 ANTEPROJETO

Este capítulo é separado para o estudo de todos os conceitos necessários para a execução do projeto do dispositivo, nele contém os passos iniciais para o seu desenvolvimento. Ele possui ainda a estratégia para definir o fator de segurança utilizado.

4.1 Escolha do coeficiente de segurança

“Uma estratégia chave de projeto é evitar a falha de uma máquina ou de uma estrutura, através da previsão e da correção de cenários de falhas potenciais no estágio de projeto” (COLLINS, 2006). Um projeto levando em conta um sistema de cargas ideais não necessitaria de um coeficiente de segurança, porque todas as cargas distribuídas na estrutura seriam conhecidas e invariáveis sem que nenhuma anomalia sobrecarregasse a estrutura, também não ocorreriam falhas na manufatura do item. Essas propriedades ideais permitem que o coeficiente de segurança (CS) seja 1, pois o sistema não precisa de um fator para prevenir possíveis cargas não estimadas no projeto e problemas de fabricação.

Um fator de segurança muito baixo pode encarecer o projeto, necessitando de mais precisão na manufatura, por outro lado um fator muito alto pode aumentar o custo com material desnecessário na construção.

Ao selecionar um fator de segurança para um projeto, pode ser utilizada uma metodologia de seleção de fatores e penalização sugerida por COLLINS, 2006. Estes fatores são divididos do seguinte modo:

1. A precisão com que podem ser determinadas as cargas.
2. A precisão com que as tensões ou outros fatores de severidade e carregamento podem ser determinados, considerando para isto as forças ou outros fatores indutores de falha.
3. A precisão com que as resistências, as falhas ou outras medidas de falhas podem ser determinadas, para o material selecionado, segundo os modos de falhas adequados.

4. A necessidade de se restringir o material, peso, espaço ou custo.
5. A gravidade das conseqüências da falha em termos da vida humana e/ou danos materiais.
6. A qualidade da mão de obra na fabricação.
7. As condições de operações.
8. A qualidade da inspeção e da manutenção disponível ou possível durante a operação.

Estes fatores recebem uma avaliação quantitativa variando de -4 a 4, dependendo da sua gravidade. No projeto do dispositivo de prensar bobinas polares os itens podem ser classificados do seguinte modo:

Fator 1: 2, pois as cargas podem variar dependendo do torque aplicado pelo operador.

Fator 2: 1, pois as cargas são aplicadas em um ponto constante com a estrutura permanecendo estática.

Fator 3: 0, o material escolhido tem tensões definidas e homogêneas, implicando que este fator não deve aumentar o fator de segurança.

Fator 4: -2, é importante que o dispositivo tenha um custo aceitável .

Fator 5: 1, as conseqüências terão danos financeiros.

Fator 6: 1, não é esperado grande precisão na fabricação e a mão de obra não deve ser muito qualificada, pois é importante que a produção não encareça o produto.

Fator 7: -2, as condições de operação não serão severas, além de ser em baixas velocidades.

Fator 8: 1, a inspeção será feita pelo próprio operador, sendo ela apenas visual.

Na equação 1 calculamos o fator t (COLLINS, 2006):

$$t = F1 + F2 + F3 + F4 + F5 + F6 + F7 + F8 \quad (1)$$

Sendo:

F_i = fator de penalização i.

$$t = 2 + 1 + 0 - 2 + 1 + 1 - 2 + 1 = 2$$

O coeficiente de segurança pode ser calculado conforme a equação (2) (COLLINS, 2006):

$$nd = 1 + (10 + t)^2 / 100 \quad (2)$$

Sendo:

nd = Coeficiente de segurança.

$$nd = 2,44 \Rightarrow nd \cong 2,5$$

4.2 Seleção do material

A seleção do material que será utilizado para a construção do projeto é fundamental para alcançar resultados satisfatórios, ele deve ser barato, já que o dispositivo deve ser projetado para ter o menor custo possível, assim como atender os requisitos de resistência mecânica exigidos. Segue abaixo os materiais selecionados para cada item da prensa.

4.2.1 Base

A base sofrerá apenas esforços de compressão sendo utilizado para ela o material ASTM A36.

4.2.2 Apoio inferior

O apoio inferior tem a função de apoiar a bobina polar sofrendo apenas esforços de compressão, sendo utilizado para ele o material ASTM A36.

4.2.3 Apoio Superior

O apoio superior tem a função de transmitir os esforços de compressão para a bobina polar, sendo utilizado para ele o material ASTM A36.

4.2.4 Suporte para alinhamento

O suporte para alinhamento tem a função de não deixar que a face interna da bobina polar se desloque. Este alinhamento é de fundamental importância, pois é ele quem garantirá a montagem perfeita entre a bobina polar e o núcleo do pólo. Este suporte não sofrerá grandes esforços sendo utilizado para ele o material ASTM A36.

4.2.5 Viga

A viga tem a função de distribuir força de prensagem para os pacotes de molas prato. Para esta viga será utilizado o material ASTM A36.

4.2.6 Pacote de molas prato.

O conjunto de molas prato é quem receberá todo carregamento de compressão para assim distribuir de forma uniforme todo o esforço para a bobina polar. Este pacote é composto de molas pratos que utilizarão o material aço mola ABNT 6150 (50 Cr V4), anel elástico, corpo o qual será fabricado com o material SAE 4140 B (barra redonda de aço laminada e beneficiada) e tampa que será fabricado com o material SAE 4140 B (barra redonda de aço laminada e beneficiada).

4.2.7 Tirantes

Será através do torque nas porcas dos tirantes que todo carregamento de compressão do conjunto terá origem, sendo este submetido a um esforço de tração sendo considerado um dos itens mais críticos do projeto. Para este componente será utilizada uma barra redonda de aço trefilada SAE 4140, a qual suporta maiores esforços de tração.

4.3 Propriedades mecânicas dos materiais selecionados

4.3.1 ASTM A36

Os valores de composição química e de propriedades mecânicas seguem a norma ASTM A36 – edição 2004, tendo tensão limite de resistência a tração de 400 a 550 MPa e tensão limite convencional de escoamento de 250 MPa, utilizando o método de ensaio ASTM A 370.

4.3.2 SAE 4140 (barra de aço redonda trefilada)

Os valores de composição química seguem a norma SAE J404 - 94, tendo tensão limite de resistência a tração de 850 MPa e tensão limite convencional de escoamento de 750 MPa, utilizando o método de ensaio ASTM A 370.

4.3.3 SAE 4140 B (barra redonda de aço laminada e beneficiada)

Os valores de composição química seguem a norma SAE J404 - 94, tendo tensão limite de resistência a tração de 750 a 900 MPa e tensão limite convencional de escoamento de 620 MPa, utilizando o método de ensaio ASTM A 370.

4.3.4 Aço mola ABNT 6150 (50 Cr V4)

Este grupo de molas prato tem processo de fabricação com conformação a quente. Devem ser temperadas e revenidas para a faixa de dureza especificada, não devendo apresentar descarbonetação superficial superior a 3% de sua espessura. Devem atender aos requisitos de carga conforme especificado no projeto. A carga deve ser medida de forma estática em molas prato individual quando submetidas a uma deflexão (f) correspondente a 0,75 h (altura livre da mola). A carga deve ser medida quando do carregamento da mola. Devem ser adotadas as tolerâncias de carga de $\pm 5\%$. O material deverá ser fornecido isento de defeitos superficiais tais como, riscos, batidas, manchas de ferrugem, fissuras, incrustações e outros defeitos detrimentais ao seu uso. Não pode receber tipagem de identificação, devido ao efeito de entalhe.

As molas devem seguir a norma básica DIN 2093 assim como a norma associada NBR 6006 que regem os requisitos para o fornecimento de Molas Prato, Série A, em Aço ABNT 1070 e 6150.

4.4 Concepção geral do dispositivo de prensar bobinas polares

Para a concepção do formato do dispositivo, foi utilizado o programa **AutoCAD™**, onde foram traçada todas as medidas tendo como base a bobina polar a ser prensada. Com estas medidas foi esboçada a forma geral da estrutura, sendo desenhados os componentes do dispositivo.

Este estudo é importante para saber quais serão os tamanhos dos componentes (Figuras 14 e 15). Com o material já selecionado assim como as cotas básicas, já se pode fazer um orçamento prévio do dispositivo analisando a sua viabilidade econômica.

Nas Figuras 13, 14 e 15 encontram-se três desenhos 2D sendo um da bobina polar e os outros dois da concepção geral do dispositivo, sendo todos feitos com **AutoCAD™**.

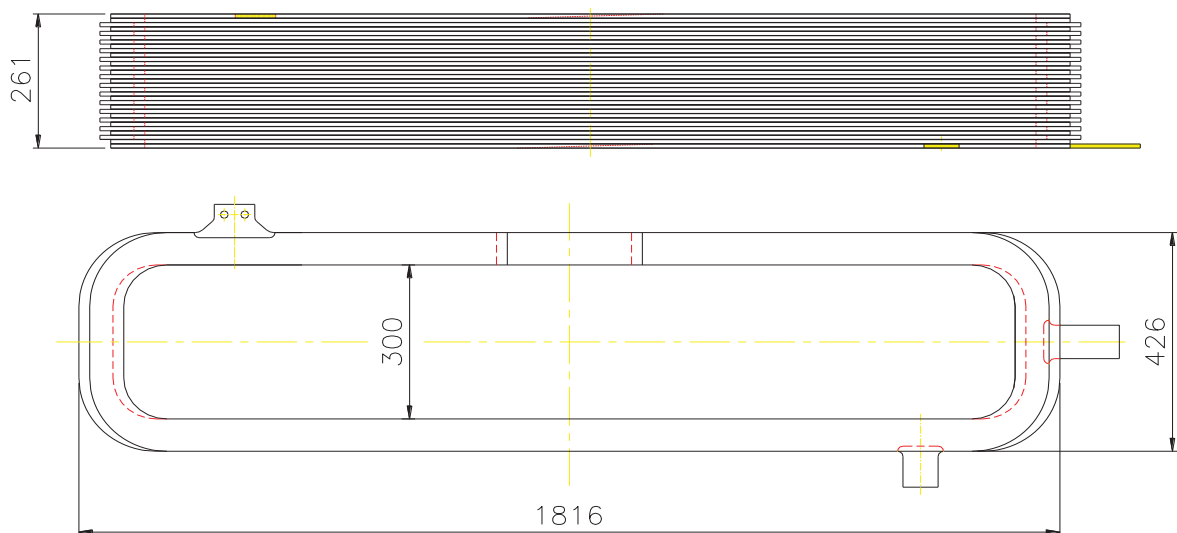
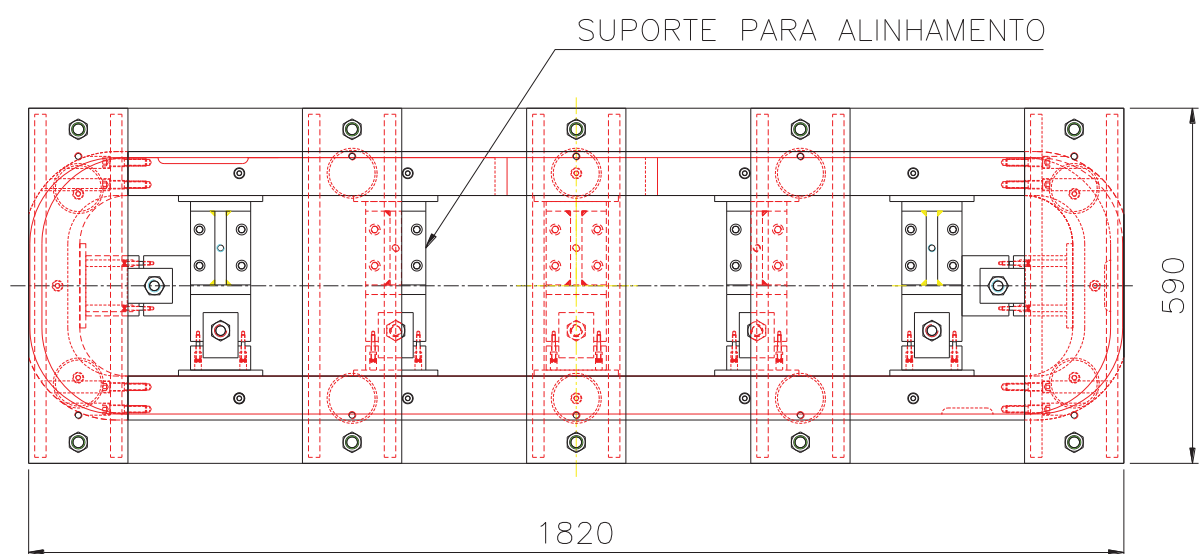
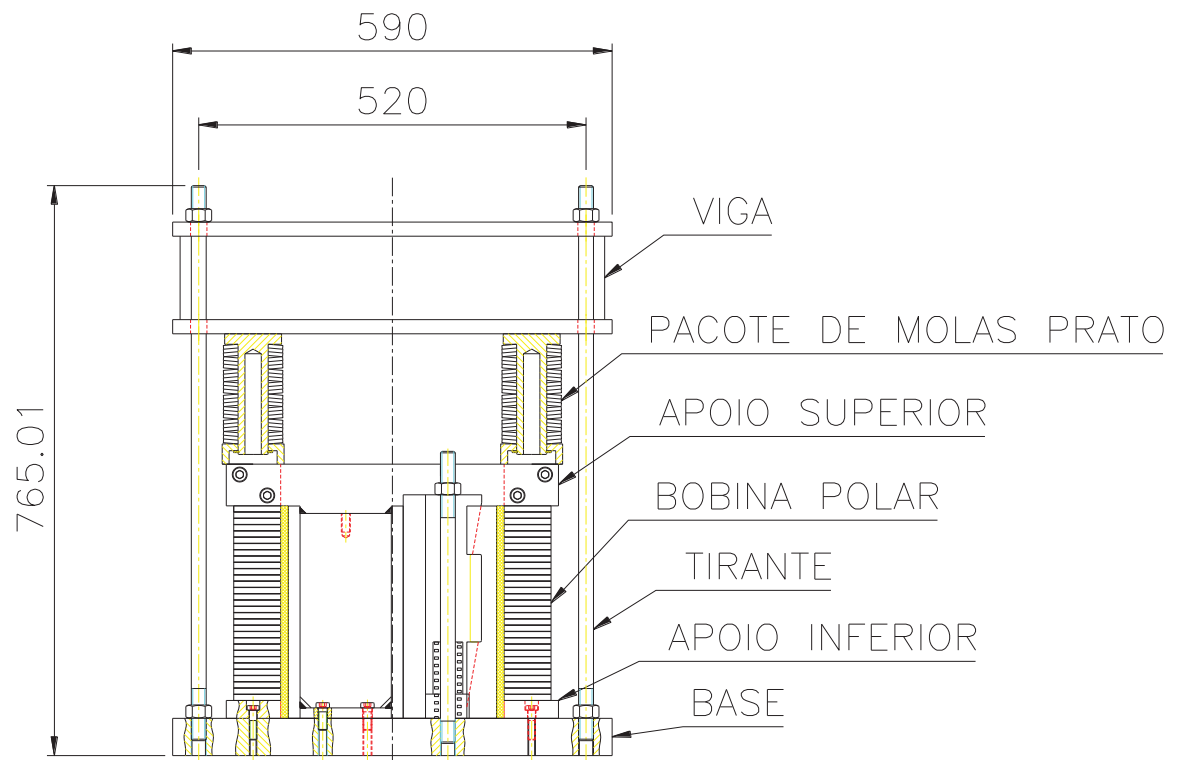


Figura 13: Bobina Polar



5 PROJETO DO DISPOSITIVO

Nesta fase do projeto as formas e dimensões gerais do dispositivo proposto e de cada elemento que o compõe já estão concebidas. Além disto, o coeficiente de segurança e o material estão definidos. Com a construção da geometria geral do dispositivo foi possível a definição das dimensões de todos componentes, porém ainda não se tem os cálculo dos elementos críticos do projeto. Neste projeto em questão, os itens que merecem maior atenção são os tirantes, pois são eles que receberão diretamente toda a carga solicitada para prensar a bobina polar, assim como a espessura da base a qual sofrerá um esforço de cisalhamento ao se tracionar os tirantes devendo a mesma ter uma espessura mínima. Este capítulo é direcionado ao dimensionamento desses tirantes assim como a definição da espessura mínima da base, desta forma garantindo que estes não se romperão ao serem solicitados.

5.1 Definindo o carregamento aplicado na bobina polar.

Para este projeto em questão, a bobina polar necessita de uma pressão específica de 50 Kgf /cm², tendo uma área total de 2495,16 cm².

Assim temos:

$$P = \frac{F}{A} \quad (3)$$

sendo:

P= pressão específica exigida no projeto;

F= carregamento aplicado na bobina;

A= área da bobina.

Substituindo os valores na equação (3) e isolando “F” temos:

$$F = 50 \times 2495,16 \Rightarrow F = 124758 \text{Kgf}$$

5.2 Dimensionamento dos tirantes.

Com a força total exigida no projeto definida no item 5.1; o fator de segurança mínimo definido no item 4.1; o material do tirante definido no item 4.2.7; assim como o número de tirantes do dispositivo definido no item 4.4, podemos começar a dimensionar o diâmetro mínimo dos tirantes.

Assim temos:

$$F_{ti} = \frac{F_{total}}{N^{\circ} \text{ tirantes}} \quad (4)$$

sendo:

F_{ti} = carregamento aplicado em cada tirante;

F_{total} = carregamento total exigido no projeto;

N° tirantes= número total de tirantes no dispositivo.

Substituindo os valores na equação (4) temos:

$$F_{ti} = \frac{124758}{10} = 12476 \text{ Kg}$$

$$F_{ti} = 12476 \times 9,81 = 122390 \text{ N}$$

Os tirantes sofrerão apenas esforços de tração.

Assim temos:

$$\sigma_{adm} = \frac{F_{ti}}{A} \quad (5)$$

Sendo:

σ_{adm} = tensão admissível do aço SAE 4140;

F_{ti} = carregamento aplicado em cada tirante;

A = área da seção transversal do tirante.

A tensão admissível é calculada pela divisão da tensão limite de escoamento do material pelo fator de segurança definido no anteprojeto.

Assim temos:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{escoamento}}{FS} \quad (6)$$

Sendo:

$\sigma_{escoamento}$ = tensão de escoamento do aço SAE 4140 (750MPa);

FS= fator de segurança (nd=2,5);

Substituindo os valores na equação (6) temos:

$$\sigma_{adm} = \frac{750}{2,5} = 300MPa$$

Isolando “A” na equação (5) temos:

$$A = \frac{F_{ti}}{\sigma_{adm}} \Rightarrow \pi \times \frac{d^2}{4} = \frac{F_{ti}}{\sigma_{adm}} \quad (7)$$

Isolando “d” na equação (7) temos:

$$d = \sqrt{\frac{F_{ti} \times 4}{\sigma_{adm} \times \pi}} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{122390 \times 4}{300 \times 10^6 \times \pi}} \Rightarrow d \cong 0,023m \quad (8)$$

Da equação (8) concluímos que o diâmetro mínimo requerido para os tirantes será de 23 mm. Desta forma utilizaremos tirantes com rosca M24 x 3,0 (passo normal).

5.3 Dimensionamento da espessura mínima da base.

Supondo-se que a carga seja uniformemente distribuída sobre a espessura da chapa e que os filetes de rosca do tirante falharão por cisalhamento no diâmetro menor, então, a tensão média de cisalhamento nos filetes da rosca será (Shigley, 1984):

$$\tau_{máx} = \frac{2 \times F_{ti}}{\pi \times d_1 \times h} \quad (9)$$

Sendo:

$\tau_{máx}$ = tensão de cisalhamento máxima do aço SAE 4140;

F_{ti} = carregamento aplicado em cada tirante;

d_1 = diâmetro menor da rosca do tirante;

h = espessura mínima da chapa da base;

A teoria da tensão cisalhante máxima estabelece que o escoamento começa sempre que a tensão cisalhante máxima em uma peça torna-se igual à tensão cisalhante máxima em um corpo de prova de tração, quando este inicia o escoamento (Shigley, 1984). Assim, pelo critério da tensão cisalhante máxima temos:

$$\tau_{máx} = \frac{\sigma_{adm}}{2} \quad (10)$$

Substituindo os valores na equação (10) temos:

$$\tau_{máx} = \frac{300}{2} = 150 \text{ MPa}$$

Substituindo os valores na equação (9) e isolando “h” temos:

$$h = \frac{2 \times F_{ti}}{\pi \times d_1 \times \tau_{máx}} \Rightarrow h = \frac{2 \times 122390}{\pi \times 20,319 \times 10^{-3} \times 150 \times 10^6} \Rightarrow h = 0,0255 \text{ m} \quad (11)$$

Com o valor obtido na equação (11), conclui-se que a base do dispositivo deverá ter uma espessura mínima de 26 mm, para garantir que não haja um rompimento dos elementos solicitados por cisalhamento.

5.4 Definindo o torque de aperto das porcas dos tirantes.

O objetivo deste item é calcular o torque de aperto que o operador deverá aplicar nas porcas dos tirantes, para que assim se obtenha a força de prensagem especificada no projeto. Este item é de vital importância, pois se não for aplicado o torque correto nas porcas, a bobina polar não apresentará as condições ideais para montagem no núcleo do pólo, podendo gerar problemas significativos na operação do hidrogerador, como possíveis fechamentos de curtos-circuitos entre as espiras das bobinas polares.

Existem vários métodos para se determinar se o tirante está com o carregamento desejado, como medindo com um micrômetro o alongamento do mesmo quando da aplicação da carga. Assim, simplesmente aperta-se a porca até o tirante alongar de uma quantidade “ δ ”. Isto assegura que o carregamento desejado seja atingido.

O alongamento de um tirante não pode ser medido, se a extremidade roscada ficar em furo cego. Em muitos casos, mesmo em montagens com porcas, é impraticável medir-se o alongamento do tirante. Em tais casos, deve-se estimar o torque de montagem necessário para estabelecer o carregamento. Então, pode-se usar uma chave com torquímetro, um sistema pneumático ou um método de controlar o giro da porca.

A chave com torquímetro tem mostrador que indica o torque aplicado. Com o sistema pneumático, a pressão do ar é ajustada de maneira que o aperto cesse, quando se atinge o torque desejado, em alguns sistemas pneumáticos, o ar é automaticamente descarregado, quando se atinge o torque desejado.

Embora os coeficientes de atrito possam ter uma ampla faixa de variação, pode-se obter uma boa estimativa do torque necessário para produzir um carregamento da seguinte maneira:

$$T = K \times F_{ti} \times d_m \quad (12)$$

Sendo:

T= torque de aperto necessário para se obter o carregamento desejado;

K= coeficiente de torque;

F_{ti}= carregamento aplicado em cada tirante;

d_m= diâmetro médio da rosca do tirante;

O coeficiente de atrito de roscas para tirantes e porcas abrangem uma faixa que vai de 0,12 até 0,20, dependendo, sobretudo, do acabamento e da precisão da rosca e do grau de lubrificação. Em média, tanto μ como μ_c estão em torno de 0,15, (Shigley, 1984).

Um fato interessante na equação (12) é que $K \approx 0,2$ para $\mu = \mu_c = 0,15$, não importando o tamanho dos tirantes empregados e nem se as roscas são grossas ou finas (Shigley, 1984). É mais conveniente escrever a equação (12) da seguinte forma:

$$T = 0,2 \times F_{ti} \times d_m \quad (13)$$

Substituindo os valores na equação (13) temos:

$$T = 0,2 \times 122390 \times 22,1595 \times 10^{-3} \Rightarrow T = 542,42 N.m$$

Com o valor obtido na equação (13), conclui-se que o torque necessário exigido na porca para se ter um carregamento adequado nos tirantes será de aproximadamente 56 Kg.m. Lembrando que este torque deverá ser aplicado em cada porca dos tirantes, para assim totalizar o carregamento desejado para este projeto.

5.5 Definindo o conjunto de molas prato adequado para o projeto.

A principal característica das molas prato é a sua capacidade de gerar uma força elástica elevada, em comparação com as molas helicoidais tradicionais em espaços comparativamente pequenos e com deslocamentos também pequenos. Estas molas

sofrem deflexões pequenas sob cargas grandes, havendo a possibilidade de serem montadas em série ou em paralelo, o que nos permite obter maiores deflexões e cargas. Para este projeto em questão, serão utilizadas molas prato em série e em paralelo. A função dos pacotes de molas é de distribuir melhor o carregamento sobre a bobina polar, desta forma com as molas em paralelo pode-se obter o carregamento desejado assim como com as molas em série iremos obter a deflexão requerida. Pelo conhecimento empírico, tem-se que um bom valor de deflexão para as molas é de aproximadamente 12 mm no pacote de molas associadas em série.

Para este projeto serão utilizadas molas prato DIN 2093 série A, conforme ilustrado na figura 16.

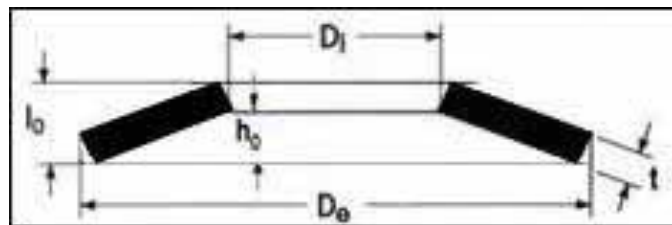


Figura 16: Mola prato DIN 2093 série A.

Sendo:

D_e = diâmetro externo;

D_i = diâmetro interno;

t = espessura da mola;

h_0 = deflexão máxima da mola;

l_0 = altura total da mola;

Para a mola prato escolhida tem-se que:

D_e = 80 mm

D_i = 41 mm

t = 4,7 mm

h_0 = 1,7 mm

l_0 = 6,4 mm

A mola prato selecionada suporta um carregamento de (P) 33600 N, assim como ela desenvolve uma deflexão (f) de 1,28 mm.

Com a mola prato selecionado pode-se iniciar a configuração que o pacote de molas deverá ter para suportar o carregamento, assim como desenvolver a deflexão requerida no projeto.

Assim, para molas prato associadas em paralelo temos:

$$P_t = n \times P \quad (15)$$

Sendo:

P_t = carga total;

P = carga por mola prato;

n = numero de molas prato;

Substituindo os valores na equação (15) e isolando “n” temos:

$$n = \frac{P_t}{P} \Rightarrow n = \frac{122387,6}{33600} \Rightarrow n = 3,64 \quad (16)$$

Com o valor observado na equação (16), deve-se utilizar 4 molas prato em paralelo, as quais suportarão um carregamento de 134400 N .

Para molas prato associadas em série temos:

$$f_t = n \times f \quad (17)$$

Sendo:

f_t = deflexão total;

f = deflexão por mola prato;

n = número de molas prato;

Substituindo os valores na equação (17) e isolando “n” temos:

$$n = \frac{ft}{f} \Rightarrow n = \frac{12}{1,28} \Rightarrow n = 9,375 \quad (18)$$

Com o valor observado na equação (18), deve-se utilizar 10 molas prato em série, as quais sofrerão uma deflexão total de 12,8 mm.

Analisando os resultados obtidos, conclui-se que deveram ser criados pacotes com 4 molas prato associadas em paralelo. Considerando estas 4 molas prato como uma unidade, deverão ser associadas 10 unidades de molas prato em série conforme ilustrado na figura 17.

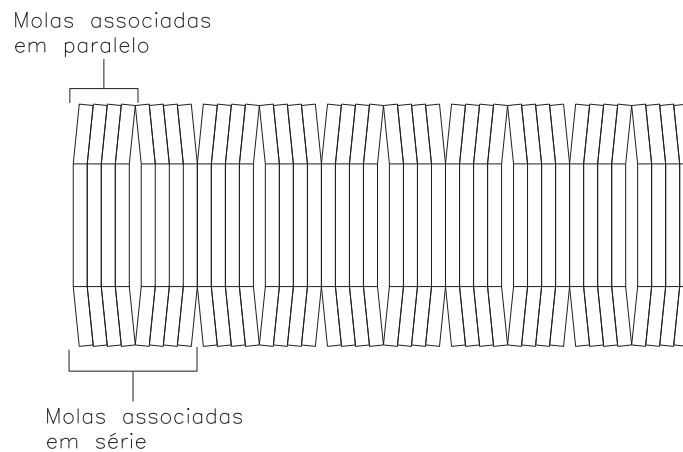


Figura 17: Pacote de molas prato.

5.6 Modelagem do dispositivo em **Inventor™**.

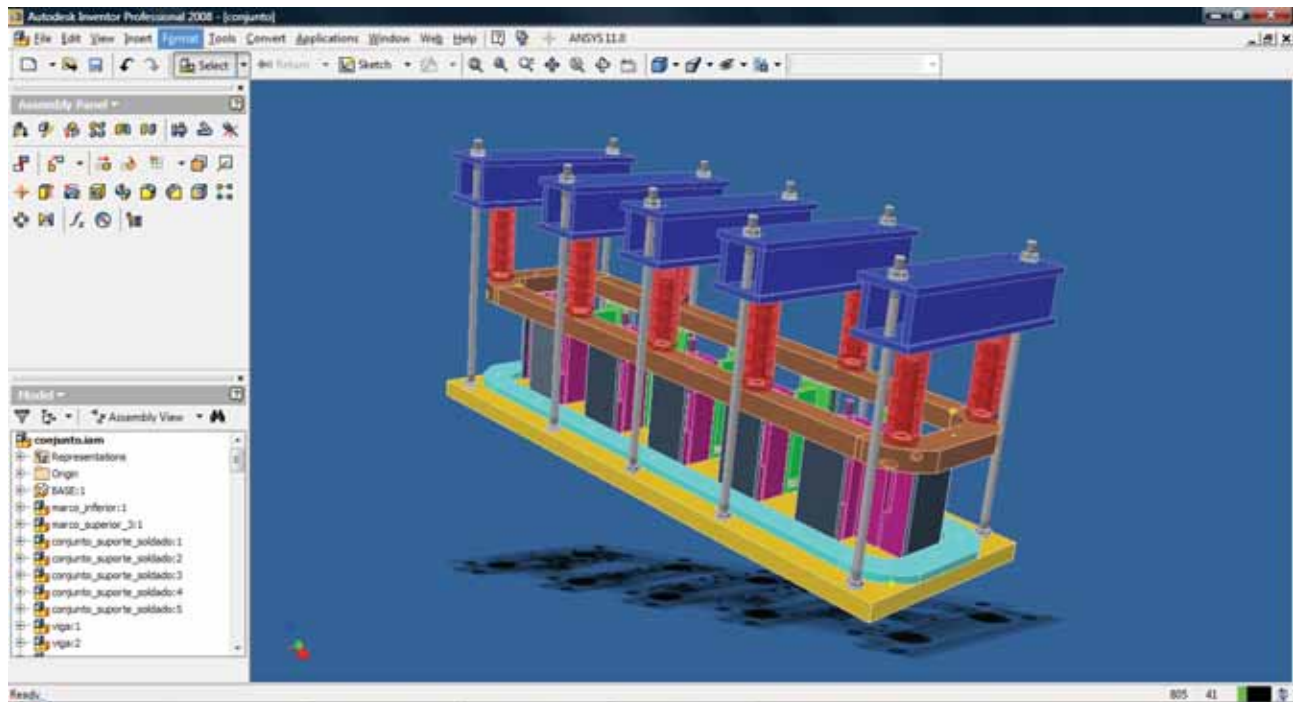


Figura 18: Dispositivo sem a bobina polar

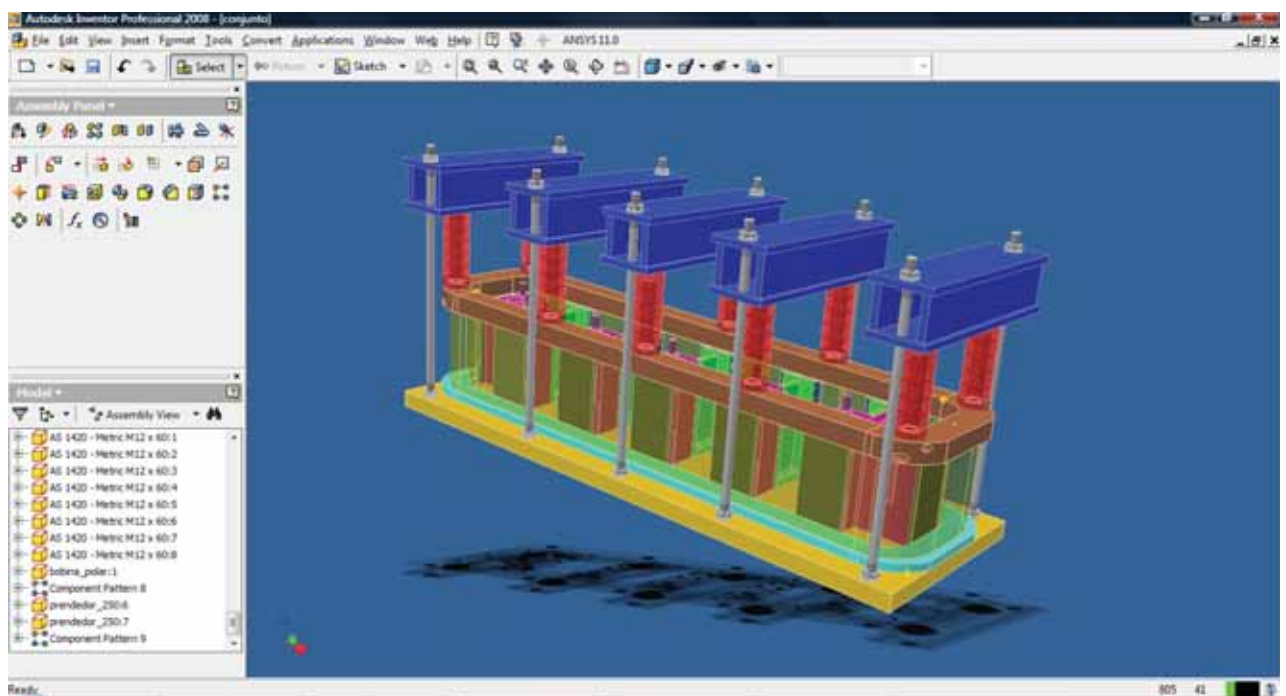


Figura 19: Dispositivo com a bobina polar

6 ANÁLISE DE TENSÃO DO TIRANTE EM ANSYS™

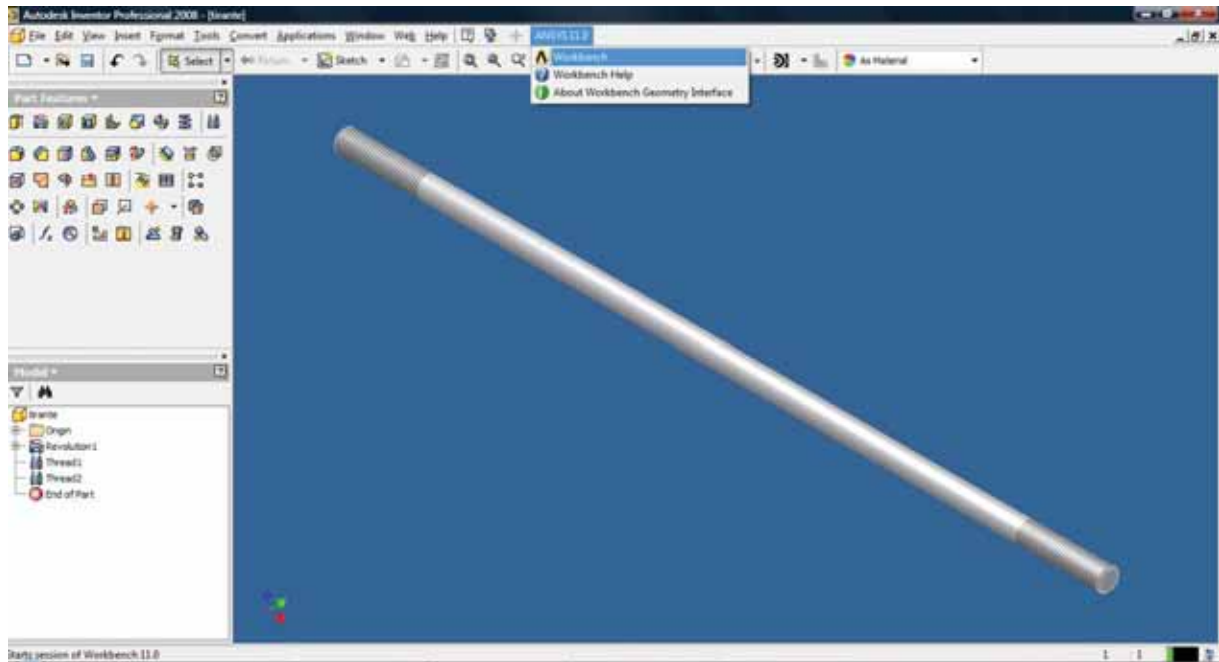


Figura 20: Transferindo o modelo do tirante do Inventor para o Ansys™.

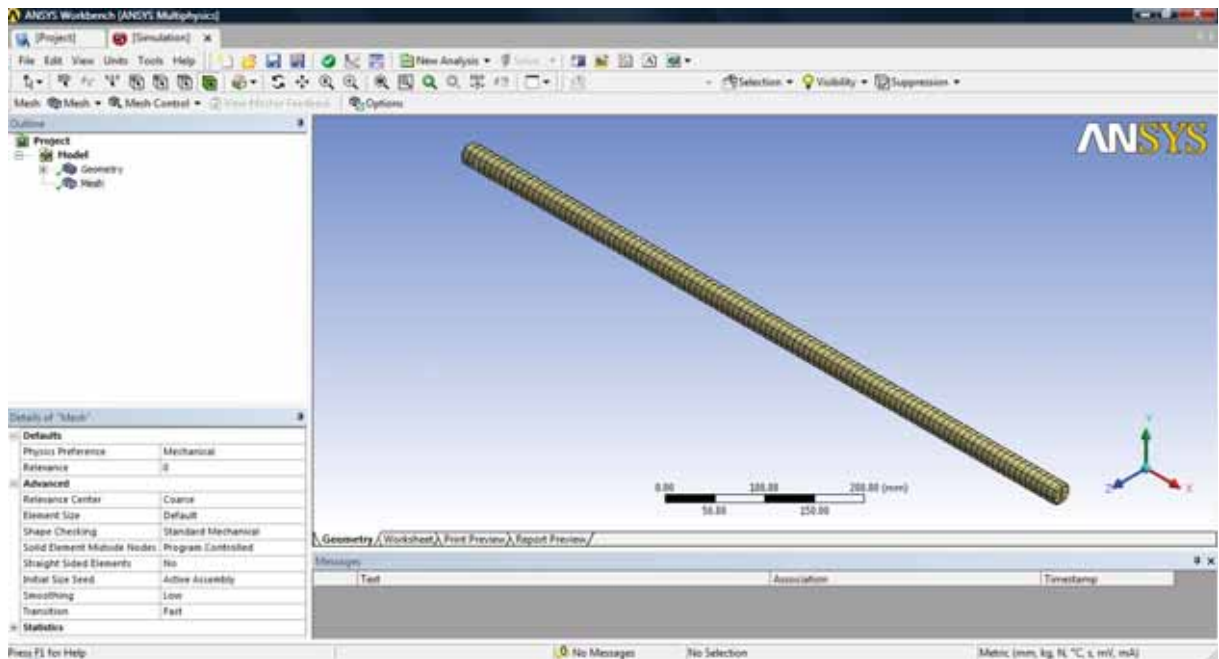


Figura 21: Gerando a malha para cálculo do tirante em Ansys™.

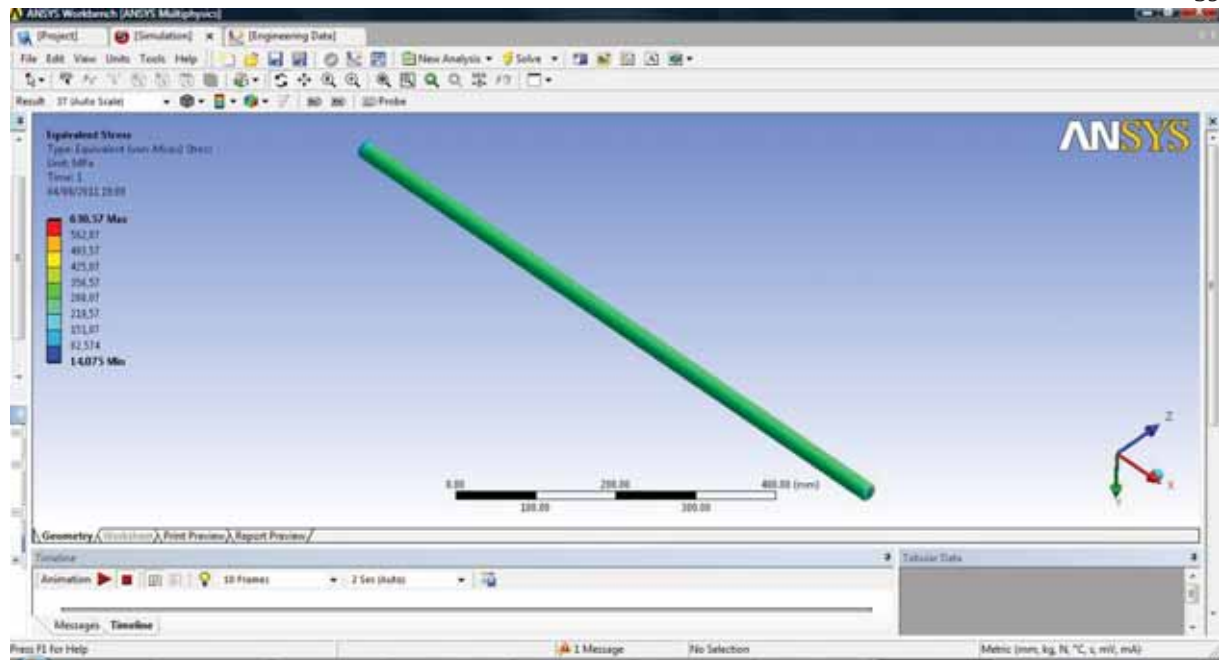


Figura 22: Resultado do calculo de tensões gerado pelo Ansys™.

7 COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS.

7.1 Processo de prensagem utilizando prensa hidráulica.

Para o processo de prensagem da bobina polar utilizando uma prensa hidráulica, o desenho de fabricação da bobina polar deverá conter as dimensões máximas da bobina, o número de espiras e a força total de prensagem. Após a análise dimensional da bobina polar, deve-se posicionar as resistências elétricas inferiores na prensa, as resistências elétricas terão a função de fornecer calor para o derretimento da resina contida nas isolações entre espiras formando uma estrutura rígida, colocar o dispositivo de prensagem interno a bobina polar, verificando a exata localização dos mesmos. Após esta etapa deve-se montar um anel desmoldante superior sobre a bobina e verificar se é necessário acrescentar calços para que a bobina não se movimente, assim montando o conjunto de resistências elétricas na face superior da bobina. Para a prensagem, deve-se posicionar as travessas da prensa sobre o conjunto e iniciar a prensagem até atingir a pressão específica especificada no projeto, que deverá acompanhar um ciclo térmico que pode variar dependendo da bobina polar a ser prensada.

Durante a prensagem, a cura da isolação é iniciada com o aquecimento do conjunto de resistências e circulando corrente pelas bobinas através de retificadores de corrente contínua, até atingir a temperatura desejada. Essa temperatura é monitorada por termopares. Após o resfriamento da bobina, deve-se aliviar a pressão e abrir as travessas da prensa, retirando o conjunto de resistências superior, o colar desmoldante e a bobina para assim remover o excesso de isolação e verniz.

7.2 Processo de prensagem utilizando o dispositivo.

O processo de prensagem utilizando o dispositivo é bem simples. Primeiro deve-se montar o apoio inferior na base, para apoiar a bobina polar sobre o mesmo, após esta etapa finalizada deve-se montar o suporte para alinhamento garantindo que a bobina fique esquadrejada e não se movimente ao se prensar a bobina. Deve-se montar o apoio superior e posteriormente posicionar os pacotes de molas prato, com isto

monta-se as vigas sobre os pacotes de molas, desta forma, montando os tirantes e suas respectivas porcas. Com o dispositivo montado, o operador deve aplicar o torque especificado no projeto para que se atinja a pressão específica.

O conjunto prensado deve ser deslocado para um forno elétrico com temperatura controlada, para que se possa dar início ao ciclo térmico da bobina polar. Após esta etapa, a bobina deve ser retirada do dispositivo para remover o excesso de resina e verniz dando fim ao processo.

7.3 Vantagens e desvantagens.

Os dois processos se mostram eficientes em seu principal objetivo que é o de prensar as bobinas polares dentro de critérios pré-estabelecidos de qualidade. A prensa hidráulica tem a vantagem de poder prensar diferentes tamanhos de bobinas polares além de não necessitar de um forno elétrico para a execução do ciclo térmico, porém a mesma não pode ser locomovida, o que dificulta quando se necessita executar reformas de hidrogeradores, onde os pólos têm de ser deslocados da reforma até a fábrica implicando em custos de transporte. O dispositivo de prensagem tem como principal característica a sua mobilidade, onde o mesmo pode ser deslocado junto à reforma, além de ser facilmente operado não exigindo formas de controle muito apuradas, porém o mesmo só pode prensar um tipo específico de bobina polar além de necessitar de um forno elétrico para a execução do ciclo térmico.

8 CONCLUSÕES

Esse trabalho demonstrou que é viável a fabricação do dispositivo para prensar bobinas polares para hidrogeradores, sendo de grande valia no requisito redução de custo principalmente no item transporte ao se conseguir executar as prensagens das bobinas em obra.

Ao se comparar os processos de prensagem entre o prensa mecânica e a prensa hidráulica constatou-se que a operação e manipulação da prensa mecânica são feitas de modo muito simplificado em comparação a prensa hidráulica tendo resultados satisfatórios quanto a qualidade ao se prensar as bobinas polares.

Esse trabalho contou com a ajuda de programas úteis aos engenheiros, sendo um deles o **INVENTOR™** que é utilizado para a modelagem de sólidos em três dimensões, ele também permite a montagem completa do dispositivo e após isto a simulação da movimentação, caso haja interferência entre os componentes ela é revelada.

Projetar equipamentos utilizando este programa é de muita valia para as empresas, com isto os custos do projeto são reduzidos, pois evita a revisão de projetos que é ocasionado pela interferência entre componentes do protótipo.

Mais que a modelagem, o **INVENTOR™** é interligado ao **ANSYS™** que é um software de simulação que utiliza o método dos elementos finitos para análise de tensões. Com ele foi possível analisar as tensões geradas no tirante ao se aplicar à carga de tração.

8.1 Sugestões para próximos trabalhos.

Com a finalização do projeto, verificou-se a oportunidade de melhoramento no mesmo, principalmente no quesito custo. Molas pratos são itens de elevado custo, sendo uma sugestão para o próximo trabalho a substituição de molas pratos por molas helicoidais.

9 REFERÊNCIAS

COLLINS, J. A. Projeto mecânico de elementos de máquinas: uma perspectiva de prevenção da falha. 1º Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 740p.

Shigley, J. E. Elementos de Máquinas. Vol. 1, 3ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 1984.

10 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Ausgewählte Kapitel des Elektromaschinenbaus – Training for ABB/ALSTOM Power employees by Prof. G. Neidhöfer, 1994.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. Resistência dos materiais. 3. ed. Rio de Janeiro: Makron Books, 1995.

DEL TORO, V., Fundamentos de Máquinas Elétricas, Editora LTC, 1994.

Fitzgerald, A. E. (Arthur Eugene), 1909- Electric machinery / A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans - 6th ed.

Norton, R.L.: Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada. 2a edição. Porto Alegre: Bookman, 2004.

PROVENZA, F. Desenhista de máquinas. 47ª Ed. Rio de Janeiro: Editora F. Provenza, 1996.525p.

PROVENZA, F. Projetista de máquinas. 71ª Ed.- reimpressão. Rio de Janeiro: Editora F. Provenza, 1996. 525p.

The Evolution of the Synchronous Machine; Prof. Gerhard Neidhöfer; Published with ABB Review 1/1992 available at ABB Marketing Ltd., P.O.Box 8131; CH-8050 Zürich.