

Projeto e Dimensionamento da Tampa de Ventilação
de um Motor elétrico

JOSÉ MIGUEL LEAL DA ROCHA

Tese submetida para a obtenção do grau de Mestre de Engenharia Mecânica,
ramo Materiais e tecnologias de fabrico

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



6 de dezembro de 2014

Relatório da Unidade Curricular de Projeto do 2º ano do Mestrado em Engenharia
Mecânica, ramo Materiais e tecnologias de Fabrico

Candidato: José Miguel Leal da Rocha, Nº 1110062, 1110062@isep.ipp.pt

Orientação da Universidade: Manuel Jorge Dores de Castro

Orientação da Empresa: Daniel José Teixeira Pimenta

Coorientação da Empresa: André Filipe da Cunha Rodrigues

Empresa: WEGeuro, S. A.

Mestrado em Materiais e Tecnologias de Fabrico

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



6 de dezembro de 2014

Dedico este trabalho aos meus pais por me apoiarem em todos os anos de estudo e me ajudarem apesar de todas as dificuldades nunca abdicaram de apoiar todos os meus sonhos.

Agradecimentos

Esta tese não seria possível sem a ajuda e apoio de vários intervenientes, assim sendo antes de mais é necessário deixar o obrigado a todos que me permitiram terminar esta tese.

Em primeiro quero agradecer à WEGeuro por me permitir realizar tese a empresa e me dar a oportunidade de obter novos conhecimentos e ter novos projetos dentro da empresa.

Ao meu orientador Eng.º Jorge Castro pelo apoio e orientação desde do primeiro dia de tese.

Ao Eng.º André Rodrigues pela orientação científica e apoio nas decisões que foram tomadas ao longo da tese.

Ao Eng.º Daniel Pimenta pela sua orientação e motivação que permitiu avanços importantes com o empenho que lhe é normal, obrigado pelo seu sentimento crítico e metuculoso. Obrigado pela disponibilidade e paciência.

Um obrigado a todos os colegas de trabalho da WEGeuro que direta ou indiretamente participaram no auxílio a elaboração da tese, em especial ao Nuno Penada que permitiu libertar tempo para ser possível a realização da tese.

À Sofia pelo apoio, motivação, carinho, compreensão e paciência que me deu e me transmitiu ao longo de toda a tese, assim como o apoio nas minhas decisões

Ao meu irmão por me motivar a torna-me um exemplo dando forças para continuar.

A todos os meus amigos pelo apoio que me deram.

Resumo

Nos dias de hoje a indústria tenta tornar-se cada vez mais competitiva baixando os custos de produção e aumentando a eficiência do produto.

O presente trabalho visa desenvolver uma tampa de ventilação de um motor elétrico mais competitiva mas que cumpra com o desempenho mecânico e eficiência solicitados. Para tal, começou-se por analisar alguns motores elétricos e as suas aplicações. Seguidamente apresentam-se conceitos sobre aerodinâmica e processos de fabrico que permitem apoiar as opções tomadas ao longo do estudo.

Após o fundamento teórico é apresentado todo o processo de desenvolvimento de uma nova peça. Recorrendo a *softwares* como o *solidworks* e *Ansys*, realizou-se uma análise analítica que permitiu validar as alterações propostas na tampa de ventilação. Foram, ainda, realizadas análises experimentais com o intuito de consolidar os resultados obtidos analiticamente e garantir que o componente cumpria os requisitos impostos por organizações internacionais ligadas à indústria do *oil and gas*.

A primeira das análises experimentais realizada testa a capacidade do material resistir ao impacto de componentes de pequenas dimensões. Esta análise permitiu garantir a utilização da tampa de ventilação em todas as áreas sem limites de normalização.

A segunda permite analisar experimentalmente as alterações de *design* assim como testar alguns trabalhos futuros. Esta análise permitiu definir se no novo projeto da tampa desenvolvido deveria contemplar uma alteração do diâmetro da entrada de ar da tampa de ventilação.

Como resultados aparecem as decisões tomadas na presente tese, assim como analisar as metas que foram atingidas e que melhorias se pretende atingir de futuro tentando visar novas metas. Os resultados obtidos permitiram definir uma nova tampa de ventilação com a nova que irá beneficiar a empresa na sua competitividade no mercado mantendo a performance do motor.

Palavras-Chave: tampa de ventilação, performance, geometria, motor elétrico, ruído, impacto

Abstract

Today the industry tries to become more competitive by lowering production costs and increasing product efficiency.

This work aims to develop a more competitive fan cover for an electric motor but that complies with the required mechanical performance and efficiency. To do that, it was first analyze some electric motors and their applications. Then, there are some aerodynamics concepts and manufacturing processes that allow supporting the choices made throughout the study.

After the theoretical basis it's presented the complete development of a new piece of process. Using software like SolidWorks and Ansys, it was realized an analytical analysis which allows validating the proposed changes in the fan cover. It was also carried out experimental analysis in order to consolidate the results obtained analytically and ensure that the component follows the requirements imposed by international organizations in the oil and gas industry.

The first experimental test was carried out to test the ability of the material to resist the impact of small parts. This analysis ensured the use of the fan cover in all areas without limits standardization.

The second experimental test allowed analyzes experimentally the design changes as well as testing some future work. This analysis allowed determining if the project of the new fan cover should contemplate a change in the diameter of the air intake of the fan cover.

The decisions taken in this thesis came from the results obtained. In conclusion, it was made an analysis of the goals that were achieved and that improvements must be achieved in the future trying to seek new goals.

The results allowed us to define a new fan cover with a low cost for the company and without downgrade the performance of the motor.

Key Words – electric motor, impact test, fan cover, acoustic, air

Índice

Agradecimentos	vi
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Índice de Figuras	xiii
Índice de tabelas	xvi
Índice de Gráficos.....	xvii
Parte I - Contextualização.....	xviii
1 - A marca WEG	xviii
1.1 - WEGeuro.....	xix
2 - Objetivo.....	xx
3 - Metodologia	xx
Parte II – Revisão Bibliográfica	1
1 - Motor elétrico: breve história.....	1
1.1- Motor elétrico WEG.....	5
1.2- Tampa de ventilação de motor	8
1.3 – Conceitos básicos de normalização	10
2 – Processos de fabrico	12
2.1 – Processo de fundição	12

2.2 – Processo de conformação plástica	15
Parte III – Caso Prático.....	18
1 - Apresentação do problema	18
1.1- Tampa Existente.....	21
1.2 – Tampa base	22
1.3 – Tampa projetada	23
Parte IV – Análise de resultados	44
Parte V – Conclusões e Trabalhos futuros.....	46
1 – Conclusões.....	46
2 – Sugestão para trabalhos futuros.....	46
Bibliografia.....	48
Anexo A.....	51
Anexo B.....	58

Índice de Figuras

Figura 1- WEGeuro	xix
Figura 2 - Máquina eletrostática de Otto von Guericke [4].....	1
Figura 3 - Primeiro eletro-ímã de Sturgeon [7]	2
Figura 4 - Primeiro comutador realizado por W.Richie [8]	3
Figura 5 - Primeira locomotiva elétrica [21]	3
Figura 6 - Evolução do peso de um motor em relação à potência [22]	4
Figura 7 - Vista explodida de motor W22X. Fonte: Cortesia WEG.....	5
Figura 8 - Motor W22X. [Ilustração do autor]	6
Figura 9 - Sistemas de ventilação de motores elétricos W22X. Fonte: Cortesia WEG ...	6
Figura 10 - Exemplo de colocação de <i>encoder</i> . Fonte: Cortesia WEG.....	7
Figura 11 - Tampa de ventilação. Fonte: Ilustração do autor.....	8
Figura 12 - Exemplo de tampas de ventilação [10].....	9
Figura 13 - Exemplo de tampas de ventilação com geometria simples [11].....	9
Figura 14 - Exemplo de um ensaio de escoamento WEG [19]	10
Figura 15 - Exemplos de peças fundidas [15]	14
Figura 16 - Quadro resumo dos vários tipos de conformação plástica [18]	16
Figura 17 – Tópicos de estudo no projeto	18

Figura 18 – Tópicos de estudo na geometria.....	19
Figura 19 - Tópicos de estudo no material	19
Figura 20 - Tópicos de estudo na geometria.....	21
Figura 21 - Tampa atualmente utilizada. Fonte: Ilustração do autor.....	22
Figura 22 - Tampa de ventilação W22. Fonte: Cortesia WEG.....	22
Figura 23 - Tampa de ventilação desenvolvida inicialmente. Fonte: Ilustração do autor.	23
Figura 24 - Diferença do diâmetro interior entre o novo modelo e a existente a Cinzento a tampa existente e a azul a tampa projetada. [Ilustração do autor].....	25
Figura 25 - Diferença de espessura entre a nova tampa e a existente. [Ilustração do autor].....	26
Figura 26 - Diferença da fixação entre tampa existente e projetada	26
Figura 27 - Diferença de comprimento entre a tampa atual (cinzento) e a proposta (azul). [Ilustração do autor].	27
Figura 28 - Pormenor da costela da tampa de ventilação	28
Figura 29 - Vista de local para a inserção da rede de ventilação.....	28
Figura 30 - Pormenor de entrada para lubrificador	29
Figura 31 - Ensaio de impacto segundo a norma IEC60079	30
Figura 32 - Tabela de altura de queda da peça segundo a norma IEC60079	30
Figura 33 - Exemplo de uma das simulações efetuadas em ANSYS	31

Figura 34 - Peça de impacto utilizada no ensaio	32
Figura 35 - montagem de ensaio com o motor e o tubo	32
Figura 36 - Marca da peça após teste de impacto.....	33
Figura 37 - local onde no teste de impacto a tampa cedeu	34
Figura 38 - Teste efetuado em <i>ANSYS CFX</i> [19].....	35
Figura 39 - Vista traseira de motor antes de ensaio.....	36
Figura 40 - Coroas para simulação da entrada de ar.....	36
Figura 41 - Instrumentos utilizado para medição de velocidade do ar (1) e de ruído (2)	37
Figura 42 - Localização dos pontos de medição da velocidade do ar	38
Figura 43 - Vista a partir da entrada de ar do motor.....	38
Figura 44 - Ensaio de escoamento realizado no ANSYS [19]	40
Figura 45- Vista da rede de proteção de entrada de ar do motor.....	42
Figura 46 - Pormenor de reforço para ventilação forçada solução inicial e final ..	43
Figura 47 - Pormenor de reforços para fixação de <i>encoder</i>	43
Figura 48 - Teste de impacto para verificar zona de impacto [Ilustração do autor].....	59
Figura 49 - Teste de impacto verificação de local mais frágil [Ilustração do autor].....	59
Figura 50 - Peça utilizada para realizar teste de impacto [Ilustração do autor].....	60
Figura 51 - Desenho técnico de uma das tampas projetadas	61

Índice de tabelas

Tabela 1 - Índices de Proteção (segundo IEC60034-5).....	11
Tabela 2 - Proteção contra energia de impacto segundo norma IEC62622	12
Tabela 3 - Propriedades mecânicas de FC-200 padrão WEG	20
Tabela 4 – Ruído medido no ensaio	38
Tabela 5 - Velocidade do ar medida no ensaio.....	40

Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Relação entre o ponto de medida e a variação do ruído..... 39

Gráfico 2 - Relação entre o ponto de medida e a variação da velocidade do ar..... 41

Parte I - Contextualização

A presente tese foi desenvolvida na WEGeuro e tem como objetivo o desenvolvimento de uma nova tampa de ventilação de um motor elétrico. O estudo foi apenas centrado na gama de motores W22X e em três alturas de eixo: 315mm, 355mm e 400mm. A escolha desta gama deveu-se à necessidade de redução do seu preço de fabrico, tonando-o mais competitivo em termos económicos, e de padronização do produto, ou seja, tornar o seu *design* mais semelhante aos restantes produtos comercializados pela WEG, de forma ao cliente se identificar mais facilmente com o produto.

1 - A marca WEG

A WEG foi criada por três sócios no ano de 1961, em Jarágua do Sul, no Brasil. O nome WEG (que em alemão significa “caminho”) surge das iniciais de cada um dos fundadores Werner, Eggon e Geraldo. Quando começou a sua atividade, a WEG tinha apenas 9 colaboradores e ocupava um pequeno espaço fabril. Nos anos 70, e já com 409 colaboradores, começou a exportar os seus produtos. No entanto, só nos anos 90, quando a empresa já contava com 7808 colaboradores, começaram a aparecer filiais de venda fora do Brasil. A partir do ano 2000 (com 8343 colaboradores), a WEG entrou na globalização, passando a também produzir os seus produtos na Europa, Ásia e África. [1]

Nos dias de hoje, a marca WEG congrega fábricas espalhadas por quatro continentes, em onze países nomeadamente: Portugal, Brasil, Argentina, Áustria, México, China, África do Sul, Estados Unidos da América, Colômbia, Alemanha e Índia. Com esta distribuição fabril, a WEG pretende estar o mais próxima possível dos seus clientes e facilitar a entrada em novos mercados. Para além das fábricas espalhadas pelos quatro continentes, a WEG contém filiais comerciais, espalhadas por 22 países e atualmente efetua vendas para mais de 110 países.

A marca WEG tem soluções energéticas completadas, podendo oferecer ao cliente soluções para todas as fases do desenvolvimento do seu projeto.

1.1 - WEGeuro

A WEGeuro situa-se na zona Industrial na Maia N°1 no sector V, com uma área total de 18.150 m². Fica situada a 10 km do centro do Porto, a 8 km do porto de Leixões e a 6 km do aeroporto. Esta localização é importante quando se negocia um contrato com um possível cliente pois, assim, a empresa possui mais alternativas de transporte de mercadorias para oferecer. A WEGeuro tem atualmente cerca de 500 colaboradores.



Figura 1- WEGeuro

A WEGeuro tem como principal negócio o fabrico de motores elétricos para atmosferas explosivas¹ com certificações ATEX e IECEx. Estes motores possuem grande aplicação na indústria petroquímica, indústria mineira e indústria cereal.

¹ Entende-se por “Atmosfera explosiva” uma atmosfera onde estão presentes uma mistura de ar com substâncias inflamáveis, podendo ser essas substâncias gases, poeiras, vapores ou nevoas. [20]

Parte I - Contextualização

A larga experiência da WEGeuro em motores para aplicar em atmosferas explosivas, permite-lhe um bom conhecimento dos clientes e uma boa fatia de mercado, sendo esta uma área de negócio com pouca oferta, uma vez que são necessárias diversas certificações para aprovar uma empresa que queira comercializar nesta área.

2 - Objetivo

O objetivo do presente trabalho consiste em desenvolver uma nova tampa de ventilação que:

- Seja mais barata;
- Seja mais fácil de montar;
- Possua menor tempo de operações fabris;
- Possua um só corpo (*Unibody*);
- Possa ser utilizada em diferentes aplicações;
- Cumpra as normas para a sua utilização em diferentes ambientes (*Oil and gas e Minas*);
- Mantenha a performance aerodinâmica da peça atual;
- Melhore a performance acústica relativamente à peça atual.

3 - Metodologia

Para a realização da tese foi necessário inicialmente conhecer bem o produto (Motor) a alterar. Efetuar um levantamento dos motores fabricados dentro da empresa de forma a ter uma base sólida de conhecimento da gama que permita saber o que já foi estudado e o que devia ser mais aprofundado em cada uma das áreas do motor.

Parte I - Contextualização

Após esta identificação existiu um estudo mais detalhado sobre o componente em estudo (tampa de ventilação) e também os estudos já realizados sobre a mesma. Após esta identificação a tampa foi projetado computacionalmente aproximando o modelo computacional conforme os estudos analíticos que foram efetuados.

Após estarem reunidas todas as alterações ao modelo prontas partiu-se para uma consulta de custos que permitiu saber qual o ganho económico que a empresa vai ter com esta alteração.

Parte II – Revisão Bibliográfica

1 - Motor elétrico: breve história

A máquina elétrica nos dias de hoje é indispensável. Qualquer eletrodoméstico que exista em casa contém uma pequena máquina elétrica. Mas para a máquina elétrica ser como é nos dias de hoje, ocorreu um longo processo de evolução, começando em 41 a.C. com Tales Mileto que, ao esfregar um pouco de resina com um pano, reparou que esta resina atraía pequenos corpos. No entanto, após observar este fenómeno e apesar de ter documentado o acontecimento, nada conseguiu concluir. A explicação do sucedido apenas foi elaborada no ano de 1600, por um cientista britânico que publicou uma obra sobre a força de atracção magnética.[2]

Baseado nesta publicação, Otto von Guericke (cientista alemão), em 1663, começou a construir a primeira máquina eletrostática. Máquina esta que não se conseguia diferenciar o que era a eletricidade, ficando apenas focalizado na força electrostática que fazia atrair pequenos objetos com é exemplo uma pena [3]

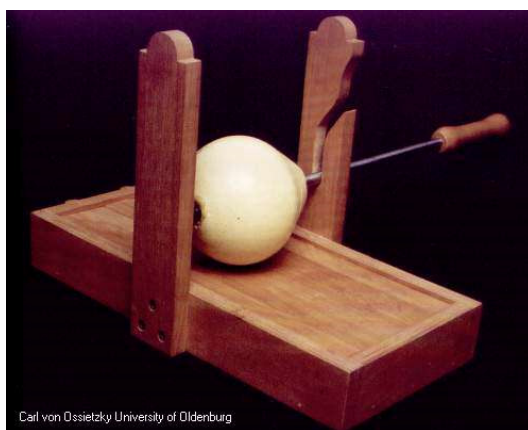


Figura 2 - Máquina eletrostática de Otto von Guericke [4]

Parte II – Revisão Bibliográfica

Este processo evolutivo teve um grande avanço, quando, em 1820, um físico dinamarquês (Hans C. Oersted), verificou que a bússola se alterava quando a passava perto de cabos elétricos, ou seja, verificou a interação entre um campo magnético e uma corrente elétrica, assim ficou provada que existe uma relação entre os fenômenos elétricos e magnéticos. [5]

Um sapateiro inglês (William Sturgeon), uns anos após a descoberta da relação do magnetismo com a eletricidade, baseando-se nesse mesmo princípio, envolveu um bocado de ferro com um fio elétrico e, ao passar corrente no fio, verificou que o ferro ficava com propriedades de ímã, mas quando a corrente era desligada, o ferro perdia essas propriedades. [6]

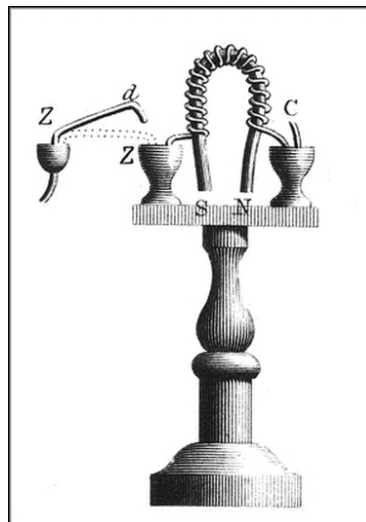


Figura 3 - Primeiro eletro-ímã de Sturgeon [7]

Após esta invenção, em 1831, Faraday redigiu a lei do eletromagnetismo e volvidos dois anos, o inglês W. Ritchie inventou o comutador, que viria a ser muito importante no desenvolvimento da primeira máquina elétrica. [8]

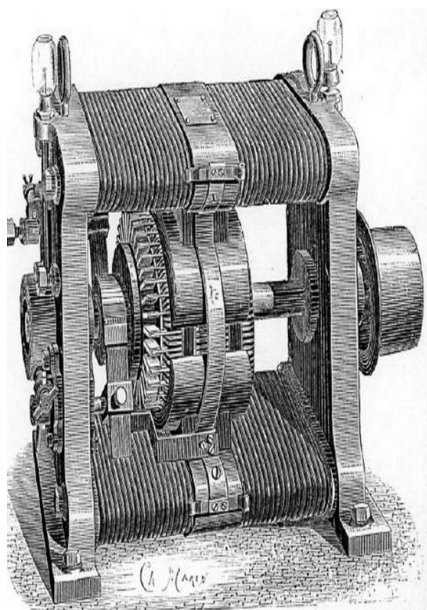


Figura 4 - Primeiro comutador realizado por W.Richie [8]

Em 1879, a empresa Siemens & Halske apresentou na Feira da Indústria, em Berlim, uma solução inovadora e revolucionária. Essa grande novidade foi uma locomotiva movida por um motor elétrico de 2KW. Apesar da sua inovação, o projeto acabou por ser abandonado devido ao alto custo e baixo rendimento. [9]



Figura 5 - Primeira locomotiva elétrica [21]

Em 1886, a Siemens inventou a primeira máquina elétrica sem utilizar um ímã permanente. Esta máquina tinha uma potência de 30 watts e cerca de 1200 rpm. [23]

Parte II – Revisão Bibliográfica

A partir desta descoberta seguiram-se várias outras que levaram a uma grande evolução da máquina elétrica, por exemplo, um motor atual pesa cerca de 8% comparativamente aos primeiros motores fabricados com a mesma potência. [22]

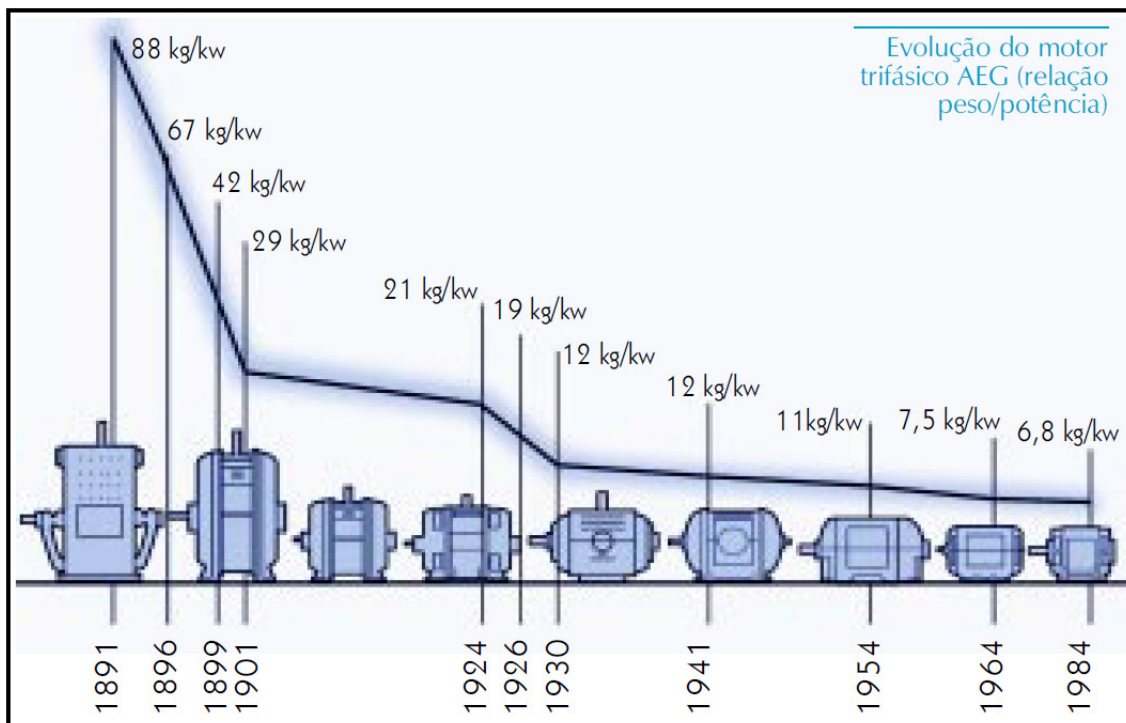


Figura 6 - Evolução do peso de um motor em relação à potência [22]

1.1- Motor elétrico WEG

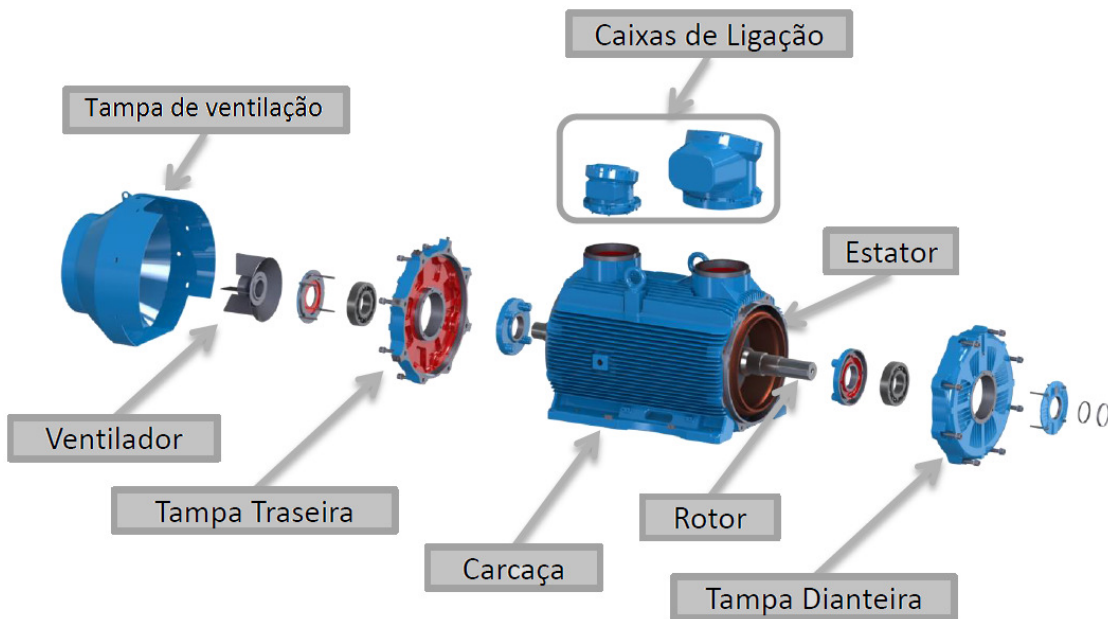


Figura 7 - Vista explodida de motor W22X. Fonte: Cortesia WEG

A WEGeuro pretende estar especializada na comercialização da gama W22X, que são motores à prova de explosão. Estes motores garantem que caso ocorra uma explosão no seu interior, esta não é transmitida para a atmosfera envolvente, evitando a ignição da mesma. Para que tal aconteça, o motor tem um involucro estanque do qual fazem parte a carcaça, tampas, caixas de terminais e placas de fecho. Do lado de fora do involucro, o motor poderá ter muitos outros componentes, tendo estes de ser também certificados para a sua área de aplicação.[Cortesia WEG]

Estes motores podem trabalhar em condições ambientais de limite (desde os 55 graus negativos até aos 60 graus positivos), o que permite uma grande flexibilidade de aplicações. A gama dos motores W22X na WEGeuro estende-se atualmente desde a altura de eixo 315 até à 500 (tendo como opcional até à gama 800).[Cortesia WEG]

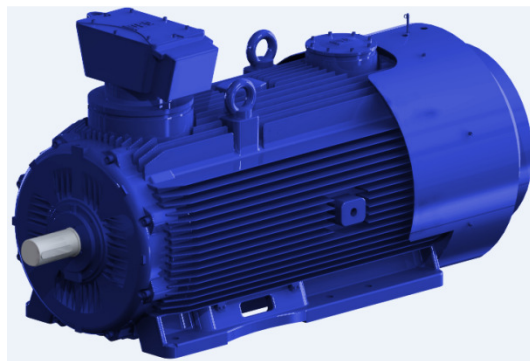


Figura 8 - Motor W22X. [Ilustração do autor]

As gamas de motores apresentadas acima são divididas nas gamas, de baixa tensão (limite de tensão 1100 volts), média tensão (entre 1100 volts até aos 6600 volts) e alta tensão (entre 6600 volts e 11000 volts). [Cortesia WEG]

No mercado existem três tipos de ventilação dominantes definidos pela norma IEC60034-6, que define o IC (*Internacional cooling*) do motor. [Cortesia WEG]

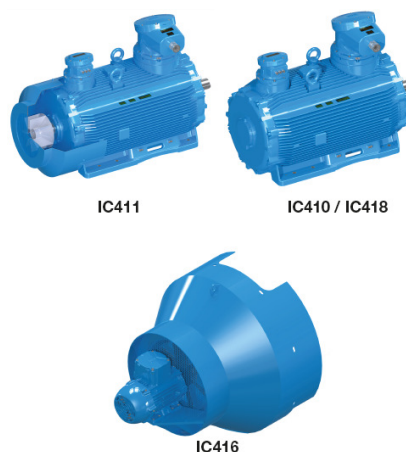


Figura 9 - Sistemas de ventilação de motores elétricos W22X. Fonte: Cortesia WEG

Como é possível verificar na Figura 9, o sistema de arrefecimento IC410 e o IC418 não utilizam sistema de ventilação, como tal não possuem tampa de ventilação. O IC411 é o sistema de ventilação mais utilizado no mercado e utiliza um ventilador que funciona com o movimento de rotação do próprio veio, que ao rodar movimentar o ar pelo interior da tampa de ventilação ao longo do motor de forma a arrefecer a superfície deste e os mancais. O sistema de arrefecimento IC 416 é utilizado em aplicações especiais, quando

Parte II – Revisão Bibliográfica

se pretende um maior arrefecimento do motor e, por isso, possui uma tampa de ventilação especial que permite suportar um motor de menores dimensões que faz rodar o ventilador que por sua vez arrefece o motor principal.

Com a finalidade de servir o mercado, existe uma utilização recorrente de *encoders*². Este equipamento é, normalmente, fixo na parte exterior da tampa de ventilação, o que obriga a uma adaptação desta tampa para suportar o seu peso.



Figura 10 - Exemplo de colocação de *encoder*. Fonte: Cortesia WEG

² É um equipamento eletromecânico que gera impulsos elétricos com a movimentos lineares ou angulares[24]

1.2- Tampa de ventilação de motor

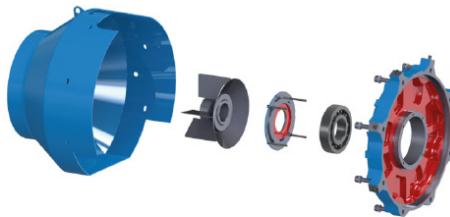


Figura 11 - Tampa de ventilação. Fonte: Ilustração do autor.

A tampa de ventilação de um motor elétrico encontra-se na parte traseira do mesmo, acoplada à tampa traseira ou carcaça (dependendo da gama e projeto do motor) e tem com principais funções:

- Canalização do ar para a ventilação do motor;
- Proteção contra queda de objetos;
- Proteção de uma parte rotativa do motor (ventilador).

No projeto de uma tampa de ventilação devem ser ponderados alguns aspetos importantes, nomeadamente o material a utilizar, que deve:

- Não produzir faísca;
- Não acumular cargas estáticas que possam provar descargas elétricas;
- Ter a resistência necessária para a função a desempenhar (depende do tipo de aplicação a que esta sujeito);
- Ser o mais económico possível.

Tendo em consideração os requisitos necessários para os materiais a utilizar numa tampa de ventilação, a escolha fica reduzida a materiais metálicos, entre os quais se destaca o ferro fundido cinzento, pois permite a realização em série de peças com uma geometria complexa e o seu custo é relativamente baixo comparativamente com o do aço.

Parte II – Revisão Bibliográfica

Durante a seleção do material a utilizar é importante considerar os processos de fabrico de obtenção da tampa de ventilação. Como referido anteriormente, os principais materiais utilizados no fabrico da tampa de ventilação são materiais metálicos e, como tal, os processos de fabricos mais utilizados são: fundição, conformação plástica, soldadura e quinagem (temas abordados no capítulo 1.4).



Figura 12 - Exemplo de tampas de ventilação [10]

A geometria das tampas de ventilação foi submetida a diversos estudos ao longo dos anos, o que o que permite, atualmente ter uma base sólida de estudo. Diferentes geometrias da tampa de ventilação permitem obter diferentes performances do motor.

Ao longo dos anos a WEG tem efetuado estudos de forma a melhorar o rendimento de ventilação do motor (desses estudos são exemplos a tese de mestrado de Samuel Santos Borges e de Cassiano Antunes Cezário), pois inicialmente existia apenas uma geometria simples que se preocupava na proteção das partes móveis do motor (ventilador).



Figura 13 - Exemplo de tampas de ventilação com geometria simples [11]

Parte II – Revisão Bibliográfica

A figura seguinte mostra uma análise computacional efetuada pela WEG e publicado pela ANSYS que permite visualizar um aumento do rendimento de ventilação de um motor.

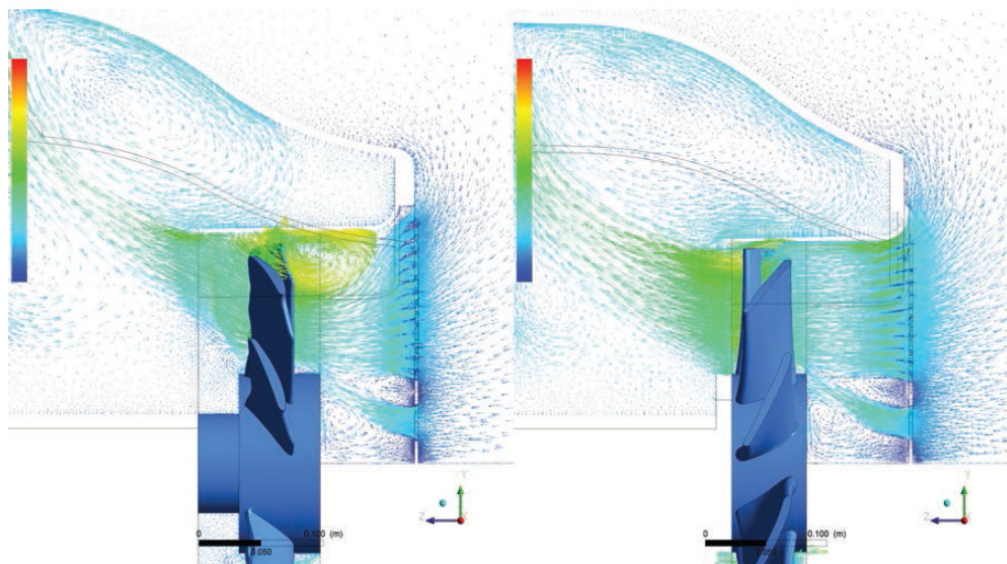


Figura 14 - Exemplo de um ensaio de escoamento WEG [19]

Pela análise da Figura 14, pode-se verificar que na imagem da esquerda existe um fenómeno de vorticidade que ocorre devido ao afastamento excessivo da pena do ventilador da chapa que guia o ar ao longo do motor. Na imagem da direita, pode-se observar uma melhoria da ventilação e uma diminuição do ruído, devido à alteração do *design* da pena e aproximação desta à chapa que guia o ar (véu), sendo assim eliminada a ocorrência de vortex.

1.3 – Conceitos básicos de normalização

Um motor à prova de explosão é projetado segundo um grupo de normas que permitem definir as limitações do produto. Para uma tampa de ventilação existem duas

Parte II – Revisão Bibliográfica

limitações: o IP (*Internacional protection*) e o IK (*Internacional impact*). Os níveis de cada uma das proteções esta definida na norma IEC6079 e seus anexos.

O IP definido para a entrada de ar é IP20 e para a saída de ar IP10, sendo que o primeiro dígito é referente à proteção contra poeiras e o segundo à proteção contra líquidos. O tipo de proteção a que cada dígito corresponde pode ser consultado na tabela seguinte.

Tabela 1 - Índices de Proteção (segundo IEC60034-5)

Número	Poeira (1º Dígito)	Líquidos (2º Dígito)
0	Não Protegido	Não Protegido
1	Protegido contra objetos sólidos maiores que 50mm	Protegido contra queda vertical de gotas de água
2	Protegido contra objetos sólidos maiores que 12mm	Protegido contra queda de água com inclinação de 15° com a vertical
3	Protegido contra objetos sólidos maiores que 2,5mm	Protegido contra salpicos de água
4	Protegido contra objetos sólidos maiores que 1,0mm	Protegido contra projeção de água
5	Proteção contra relativa contra poeiras e contato a partes internas	Protegido contra jatos de água
6	Totalmente protegido contra penetração de poeiras e contato a partes internas	Protegido contra ondas do mar
7		Protegido contra os efeitos de imersão
8		Protegido contra submersão

Para o IK³ (Tabela 2), a norma tem em consideração as várias aplicações do motor. No entanto, de forma a garantir que a peça pode ser utilizada em todos os tipos de aplicação, foi definido pela WEG, que as tampas de ventilação deveriam cumprir o IK10.

³ O IK define os a energia de impacto, em joules, que o equipamento deverá suportar.

Tabela 2 - Proteção contra energia de impacto segundo norma IEC62622

IK Código	IK00	IK01	IK02	IK03	IK04	IK05	IK06	IK07	IK08	IK09	IK10
Energia de impacto (Joule)	0	0,14	0,2	0,35	0,5	0,7	1	2	5	10	20

2 – Processos de fabrico

Dentro dos processos de fabrico os mais utilizados na obtenção da tampa de ventilação de um motor elétrico, como referido anteriormente, são:

- Fundição;
- Soldadura;
- Conformação plástica.

Estes são processos utilizados na fabricação de peças na sua maioria metálicas, visto que esses materiais são os mais utilizados.

2.1 – Processo de fundição

O processo de fabricação por fundição consiste em elevar a temperatura de um material até este estar no estado líquido vazando-o de seguida para um molde de forma a obter o formato pretendido. [14]

Existem vários tipos de fundição entre os quais:

- Fundição por gravidade;
- Fundição sob pressão;

Parte II – Revisão Bibliográfica

- Fundição em cera perdida;
- Fundição por centrifugação.

Dentro destes, o mais utilizado é o processo de fundição por gravidade, pois é mais barato e que produz bons resultados nas aplicações que são utilizadas no dia-a-dia. O cuidado que deve ser tido é que na fundição por gravidade não se consegue uma peça tao fina como por exemplo fundição sob pressão. [15]

Quando se fala de um processo fundição deve-se ter presente o tipo de peça que se pretende obter. No caso tratado na tese é uma peça de grande dimensões o que impede desde logo uma fundição em serie de grande margem assim como limita o número de tipos de fundição a utilizar sendo que a peça será fundida com o processo de areia verde. [16]

Quando se projeta uma peça é necessário ter alguns cuidados e relação à fundição tais como:

- Ângulos de saída que permitam a remoção do molde;
- Evitar contra saídas;
- Arredondar formas de peça;
- Realizar peça de forma a ser mais fácil escolher linha de apartação;
- Dimensionar a espessura da peça em conformidade com o processo.

Como passos para realizar todo um projeto de fundição deve-se ter:

1. Projetar a peça;
2. Projetar o protótipo;
3. Realizar protótipo;
4. Realizar molde;
5. Fundir material;
6. Vazar o material;
7. Desamoldação;
8. Remoção de canais de vazamento e gitos;

Parte II – Revisão Bibliográfica

9. Limpeza da peça e rebarbagem;
10. Verificação da qualidade.

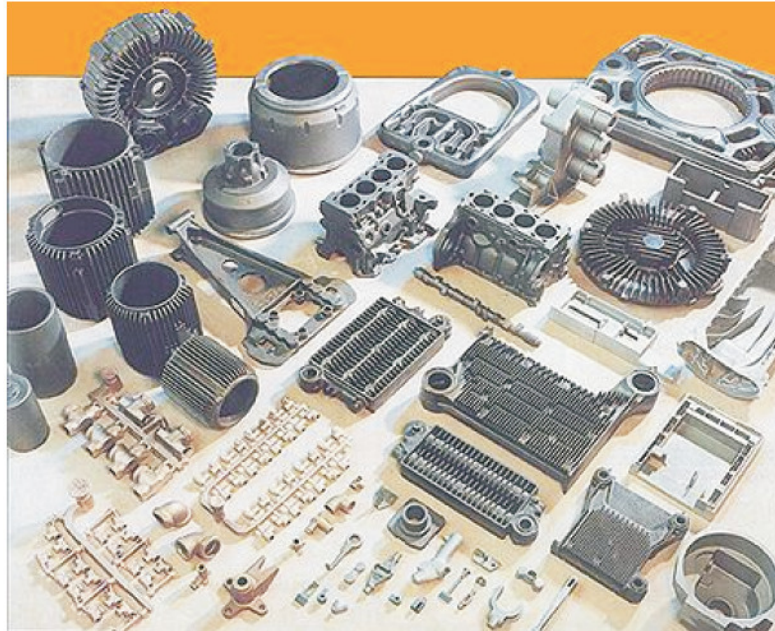


Figura 15 - Exemplos de peças fundidas [15]

Vantagens do Processo de Fundição [26]:

- É barata a matéria-prima;
- Permite geometrias complexas;
- No caso de pequenas peças permite grandes series;
- Permite reutilizar materiais;

Desvantagens do processo de Fundição [25]:

- Ocorrência de defeitos;
- Necessidade da fabricação de molde;
- Dimensionamento do processo;
- Elevado custo da fabricação do molde;
- Elevado gasto energético na fusão de material;

- Não produção de quinas vivas.

2.2 – Processo de conformação plástica

O processo de conformação plástica consiste em formar “moldar” uma chapa numa geometria pretendida, pressionado o material contra o molde que lhe dará forma. Um processo de conformação plástica provoca uma alteração permanente na peça.[30]

Existem vários tipos de conformação plástica:

- Forjamento;
- Laminação;
- Trefilagem;
- Extrusão;
- Estampagem;
- Quinagem;
- Embutimento;
- Estiramento;
- Corte;

- Dobragem.

Processo	Força Preponderante	Trabalho		Ilustração	Semi-produtos ou produtos	
		a quente	a frio		Aço	Não-ferrosos
Laminação	Compressão direta	x			Placas Chapas Barras Perfis	Placas Chapas Barras
			x		Chapas	
Trefilação	Compressão indireta		x		Barras Arames Fios	Barras Arames Fios Tubos
Extrusão	Compressão indireta	x			Tubos	Barras Tubos Perfis
			x		Peças pequenas extrudadas	Peças longas extrudadas
Forjamento	Compressão direta	x			Peças forjadas	
			x		Peças pequenas forjadas	
Estampagem (profunda)	Compressão indireta em parte	x			Peças grandes estampadas (a partir de placas)	
			x		Peças de chapas estampadas	
Estiramento de chapas	Tração		x		Peças de chapas estiradas	
Dobrimento	Flexão	x	x		Peças de chapas e tiras dobradas	
Calandragem	Flexão		x		Tubos	
Corte	Cisalhamento	x	x		Peças cortadas de chapas ou perfis pequenos diversos	

Figura 16 - Quadro resumo dos vários tipos de conformação plástica [18]

Uma tampa de ventilação utiliza vários processos de conformação plástica que permitem dar-lhe a forma exterior pretendida. No entanto o mais utilizado a calandragem, pois este processo permite dar-lhe a forma circular que é característica desta peça. [29]

Vantagens do processo de conformação plástica [27] [28]:

- Ideal para fabricação de peça única;
- Não necessita de equipamentos específicos para cada peça;
- Peças mais finas;

Desvantagens do processo de conformação plástica [27] [28]:

Parte II – Revisão Bibliográfica

- Custo do processo alto;
- Fabricação de peças únicas;
- Apenas permite geometrias simples;
- Necessários processos adicionais (ex.: Soldadura).

Parte III – Caso Prático

1 - Apresentação do problema

Atualmente a WEG sente necessidade de se tornar mais competitiva no mercado a nível de custo do motor elétrico, assim sendo é necessário baixar o custo de produção não comprometendo o desempenho do produto. O presente trabalho foca-se apenas nas tampas de ventilação pois já foram realizados estudos de melhoramento das restantes peças do motor.

Seguidamente apresentam-se os vários parâmetros que é necessário ter em consideração para desenvolver uma tampa de ventilação.

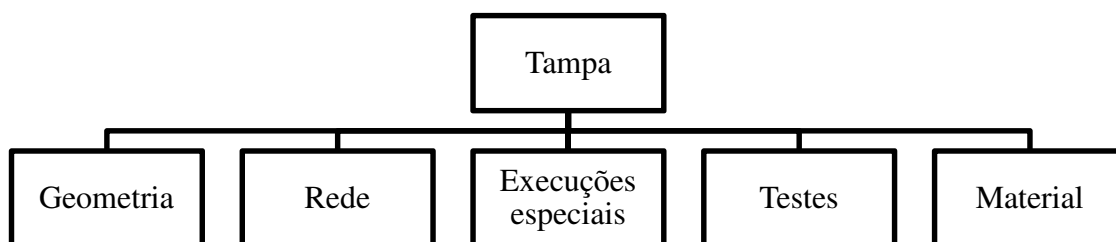


Figura 17 – Tópicos de estudo no projeto

A geometria engloba a forma exterior da tampa, a fixação e a espessura. A forma exterior é importante para melhorar o rendimento e reduzir o ruído. Para fixar a tampa e o motor utilizam-se parafusos pois estes permitem uma fácil fixação e caso seja necessário retirar a tampa de ventilação basta desapertar (o que não se verificava caso se usasse soldadura). A espessura da tampa também é objeto de estudo e é definida através de ensaios mecânicos de impacto e de simulação computacional de esforço mecânico.

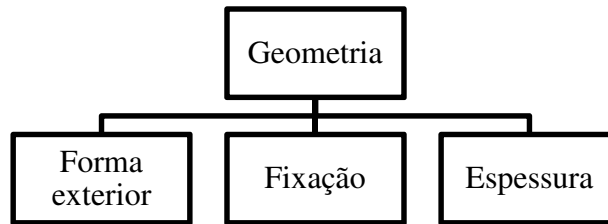


Figura 18 – Tópicos de estudo na geometria

Na seleção do material é necessário ter em atenção as normas internacionais. Como foi referido na revisão bibliográfica (Parte II), o material não deve ser acendível, o que retira da lista de hipóteses os materiais não metálicos e alguns materiais metálicos, como o cobre e o titânio (devido aos elevados preços).

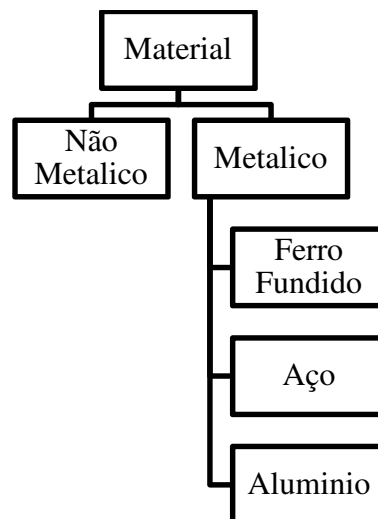


Figura 19 - Tópicos de estudo no material

O material selecionado para fabricar a tampa de ventilação poderia ser o ferro fundido, o aço ou o alumínio. No entanto, o alumínio não cumpre as normas de ensaios de impacto necessárias (IK). Comparando o aço e o ferro fundido, o ferro fundido apresenta as seguintes vantagens [13]:

- Baixo de custo de produção;

Parte III – Caso Prático

- Possibilidade de fabrico de formas complexas;
- Menor número de processos de maquinagem;
- Possibilidade de fabrico em série;
- Resistência à corrosão;
- Amortecimento de vibrações;
- Sem quinas vivas.

No entanto, o ferro fundido também possui algumas desvantagens comparativamente ao aço, tais como:

- Maior espessura devido aos processos de fabrico inerentes;
- Baixa resistência plástica;
- Difícil soldabilidade;
- Podem ocorrer defeitos estruturais inerentes ao processo;
- Necessária fabricação de molde para obtenção da peça.

Assim sendo a seleção recai sobre o ferro fundido cinzento (FC-200), visto que, este material é fundido internamente na empresa reduzindo muito o custo de material de mão-de-obra, assim como o tempo de entrega do material podendo ser agilizados prazos.

Ao selecionar o ferro fundido fica reduzido o número de processos de fabrico possíveis para a elaboração da peça, uma vez que o processo mais indicado para este material é a fundição. No entanto, isso cria a necessidade de realizar um molde para a peça, molde esse que será realizado pela empresa fornecedora (WEG Brasil).

Tabela 3 - Propriedades mecânicas de FC-200 padrão WEG

GRANDEZA	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADE
Densidade	ρ	7180	kg/m ³
Coefficiente de Poisson	ν	0,24	-
Módulo de Elasticidade Longitudinal	E	90	GPa
Tensão de Ruptura em Tração	σ_{rt}	200	MPa
Tensão de Ruptura em Compressão	σ_{rc}	600	MPa
Elongamento máximo	e	1	%

Relativamente à rede, esta poderá ser amovível ou integral. A seleção no tipo de rede baseia-se essencialmente em dois aspetos: o rendimento do motor e o custo.

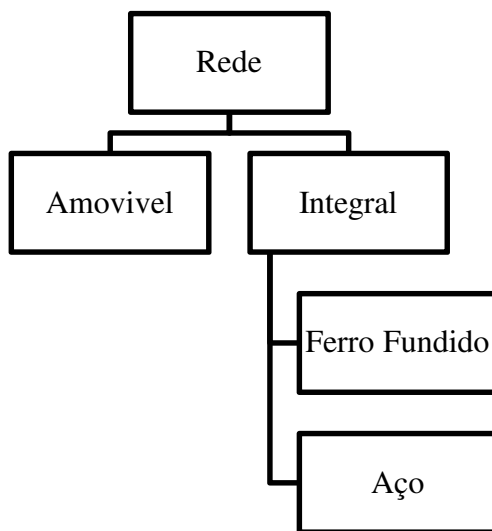


Figura 20 - Tópicos de estudo na geometria

Como não existe a necessidade de a rede ser amovível, a opção é uma rede integral. Esta rede integral poderá ser construída em aço e soldada por pontos ou em ferro fundido, sendo fundida com o resto da tampa.

1.1- Tampa Existente

Ao realizar este estudo pretende-se substituir a tampa existente e utilizada nos motores elétricos atualmente. Analisando a tampa já existente pode-se identificar vários aspetos a melhorar, tais como:

- Comprimento que a tampa sobrepõe sobre as alhetas do motor;
- Várias execuções conforme a aplicação do motor;
- Rede fabricada num material diferente ao do resto da tampa;
- Olhal de suspensão da tampa prejudica o *design*;
- Necessidade de redução do espaço entre a tampa e a carcaça, de forma a cumprir a normalização;
- Geometria retilínea que prejudica o funcionamento do equipamento.

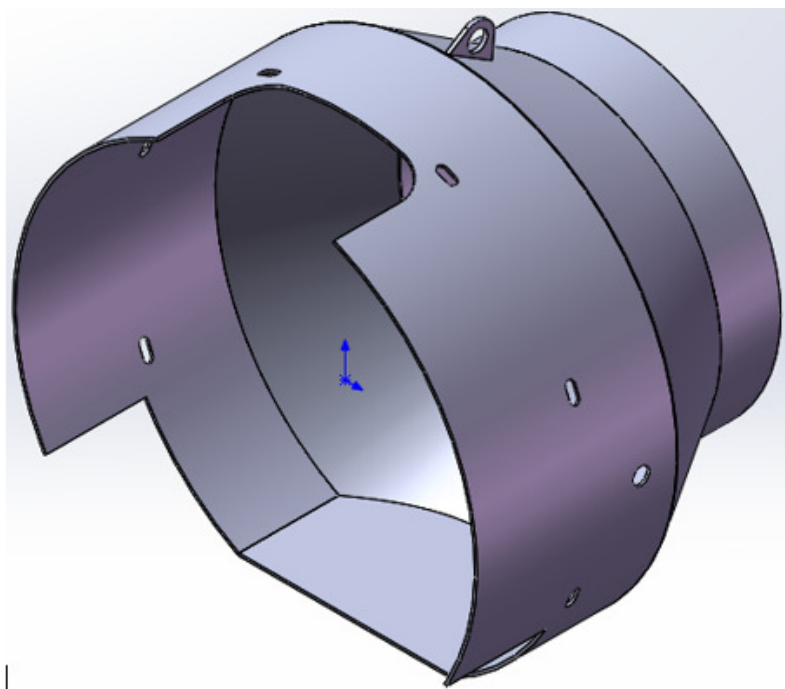


Figura 21 - Tampa atualmente utilizada. Fonte: Ilustração do autor.

1.2 – Tampa base

Como base inicial para o desenvolvimento da tampa de ventilação foi utilizada uma tampa já existente de outra gama (W22). A nova tampa de ventilação deverá ser um modelo semelhante à tampa base (W22), de forma a facilitar a criação de um novo molde para fabricação da tampa de ventilação e, também, para uniformizar os produtos da empresa facilitando a sua identificação por parte dos clientes.

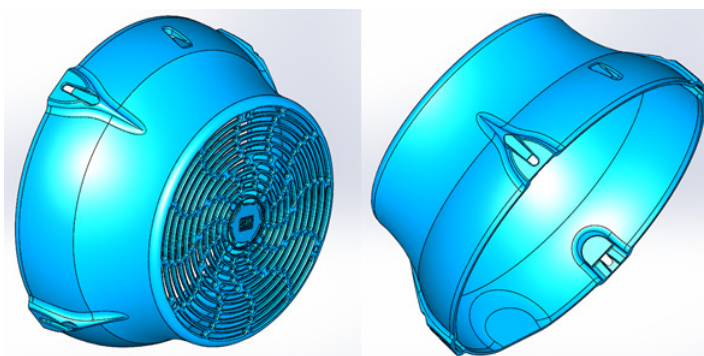


Figura 22 - Tampa de ventilação W22. Fonte: Cortesia WEG

A tampa do motor W22 utilizada como base foi alvo de um estudo a nível de custo e de desempenho aerodinâmico muito abrangente que permitiu uma base sólida de estudo (tese Cassiano).

1.3 – Tampa projetada

1.3.1- Alterações geométricas

Na proposta inicial da tampa de ventilação efetuaram-se alterações geométricas de forma a cumprir os novos requisitos propostos. Como a nova tampa a ser desenvolvida utilizará como material o ferro fundido, isso permitirá que exista uma maior liberdade de formas.

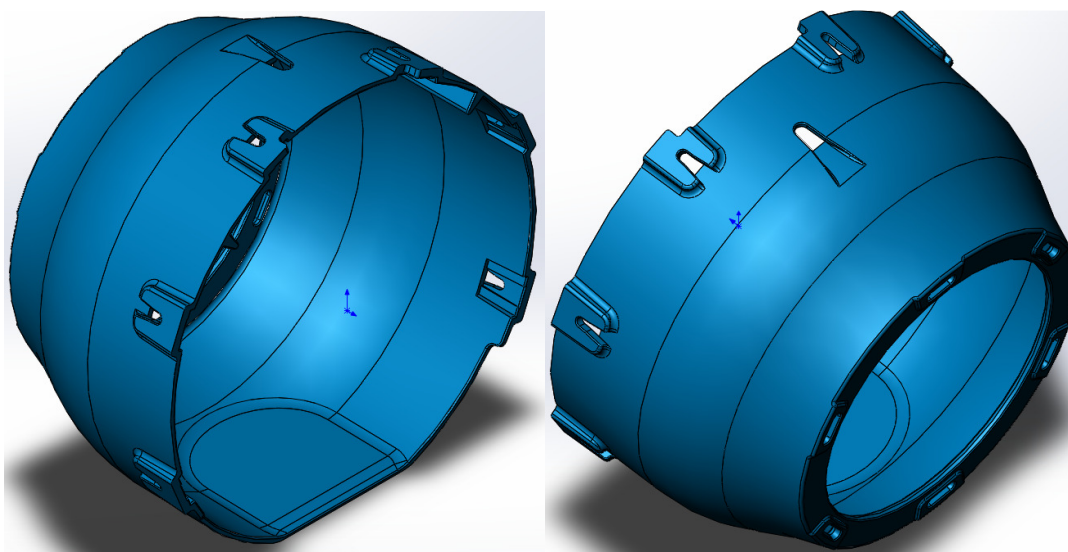


Figura 23 - Tampa de ventilação desenvolvida inicialmente. Fonte: Ilustração do autor.

As alterações geométricas efetuadas na peça foram:

- a. Redução do diâmetro interno da tampa de forma a canalizar o ar para as alhetas do motor como pode ser verificado a Figura 24;
- b. Alteração da espessura da tampa;

- c. Alteração das fixações do motor;
- d. Redução do comprimento da tampa;
- e. Inserção de uma costela interior para reduzir espaço livre entre carcaça e tampa de ventilação;
- f. Remoção da rede de ventilação (ideia inicial seria colocar a rede com o suporte de parafusos utilizando as saliências existentes de fundição).
- g. Furo de passagem para lubrificador.

Todas alterações geometrias apresentadas são explicadas em detalhe seguidamente.

a. Redução do diâmetro interno da tampa

A redução do diâmetro interno da tampa, aproximando-o ao diâmetro da carcaça do motor permite que o ar ao ser canalizado do sistema de ventilação para a carcaça circule mais perto da carcaça. Quanto mais próximo da superfície circular o ar maior será o arrefecimento da superfície exterior da carcaça.

Na Figura 24, pode-se verificar que a nova tampa tem um raio 15.72 mm menor que o raio da tampa existente. Ou seja, a tampa existente conduzia o ar muito longe da superfície da carcaça e para que o ar não se perdesse era necessário esta ser mais comprida e sobrepor-se mais sobre o motor. Por esta razão, a tampa projetada tem um diâmetro menor, permitindo assim que o ar seja conduzido junto à superfície e que elimine a necessidade desta ser prolongada. A peça existente não permitia que o diâmetro interno fosse menor por limitação do processo de fabrico.

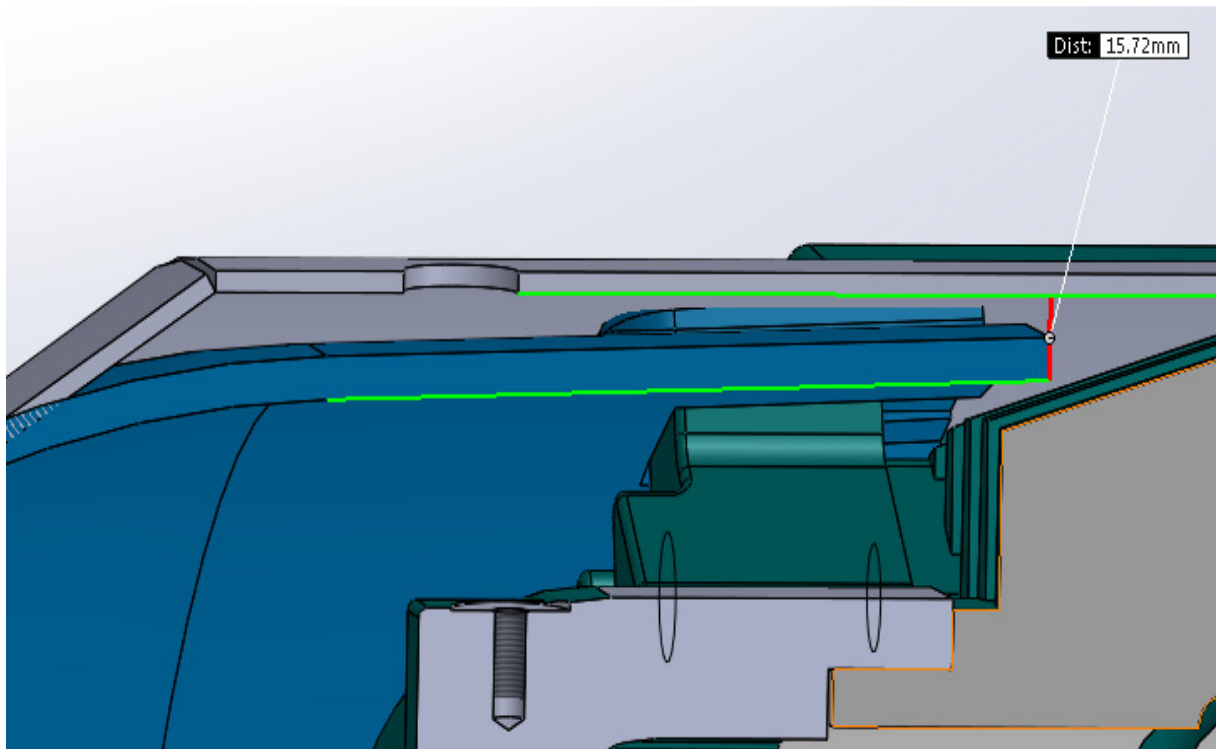


Figura 24 - Diferença do diâmetro interior entre o novo modelo e a existente a Cinzento a tampa existente e a azul a tampa projetada. [Ilustração do autor].

b. Alteração da espessura da tampa

Como o ferro fundido tem uma menor resistência ao impacto e por motivos de processo de fabrico (a fundição obrigado a maior espessura), foi necessário duplicar a espessura da peça. Assim sendo, a nova tampa poderá ser mais pesada do que a existente. Esta situação não é preocupante pois o peso é pouco significativo para o conjunto final do motor.

A espessura passou a 8 mm sem se efetuar um estudo de molde aprofundado uma vez que a peça que serviu como base tinha a mesma espessura e o local de fabricação será o mesmo assim sendo os moldes estão dimensionados com a espessura da tampa da ventilação de base.

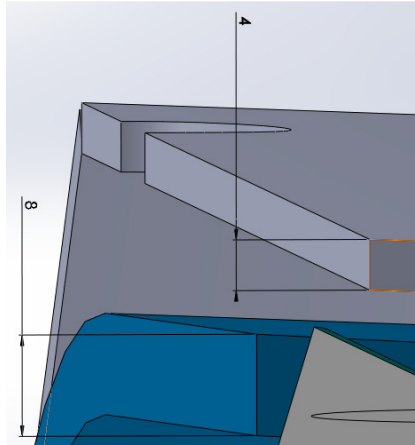


Figura 25 - Diferença de espessura entre a nova tampa e a existente. [Ilustração do autor].

c. Alteração das fixações do motor

O local da fixação da tampa de ventilação ao motor não se alterou, no entanto o *design* da fixação alterou uma vez que o processo de fabrico alterou.

Pode-se observar na imagem da esquerda a tampa existente a cinzento que o local de fixação da tampa à carcaça os furos oblongos na chapa reta, no entanto na imagem da direita esta a tampa projetada que contem o novo design de fixação este design vai permitir que os furos da tampa sejam realizados de fundição.

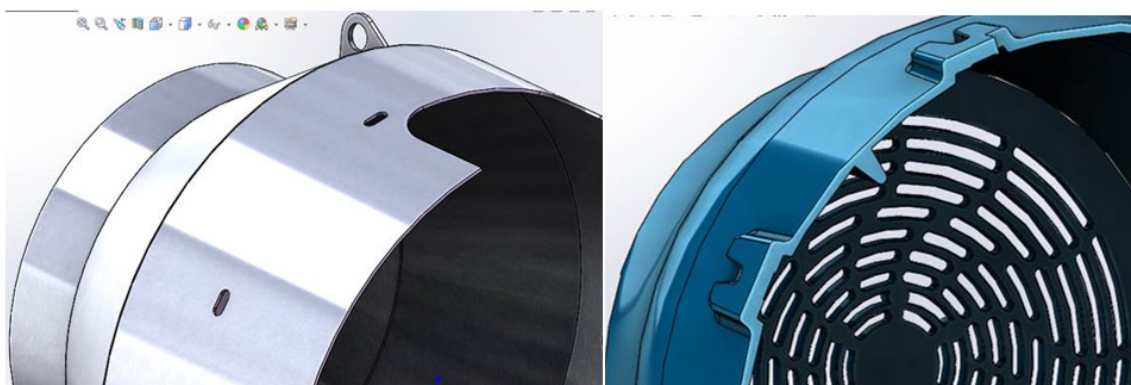


Figura 26 - Diferença da fixação entre tampa existente e projetada

d. Redução do comprimento da tampa

Como foi referido anteriormente, a tampa apenas se estendia sobre o motor para guiar o ar. Com a utilização do novo material e o novo processo de fabrico, que permitem a diminuição do diâmetro interno da tampa, é possível uma redução do comprimento da tampa. Esta redução de comprimento minimiza o aumento de peso provocado pelo aumento da espessura da tampa.

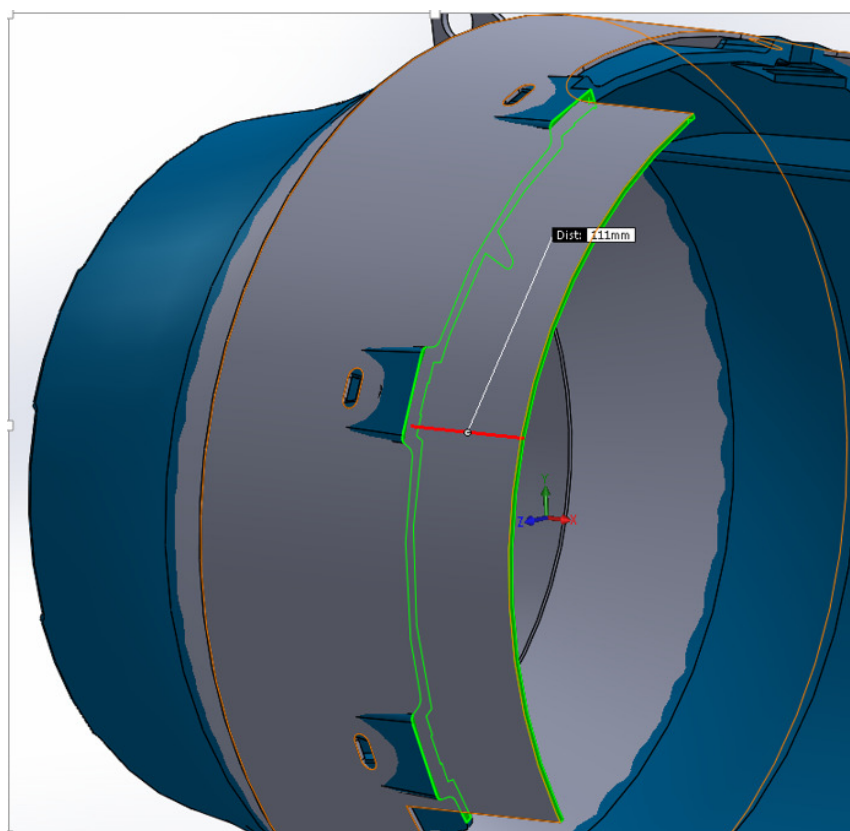


Figura 27 - Diferença de comprimento entre a tampa atual (cinzento) e a proposta (azul).

[Ilustração do autor].

e. Inserção de uma costela interior para reduzir espaço livre entre carcaça e tampa de ventilação

Devido a uma imposição de norma que deixa claro que entre a tampa e a carcaça não pode permitir a entrada de objetos maiores que 50mm (IP10), então para o

cumprimento desta norma foi criada uma costela interna na tampa de ventilação que diminui essa distância. Esta costela permite sem um aumento do custo da tampa uma peça importante na certificação do produto perante as entidades certificadoras.

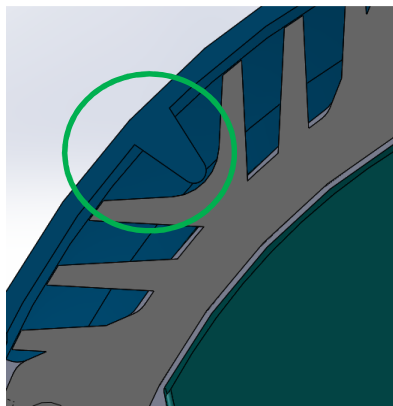


Figura 28 - Pormenor da costela da tampa de ventilação

- f. **Remoção da rede de ventilação (ideia inicial seria colocar a rede com o suporte de parafusos utilizando as saliências existentes de fundição).**

Como não tinha sido desenvolvido qualquer tipo de ensaio de impacto na tampa para observar o comportamento do material ao impacto a solução inicial não contemplava a rede deixando apenas os furos de fundição para uma rede colocada à parte.

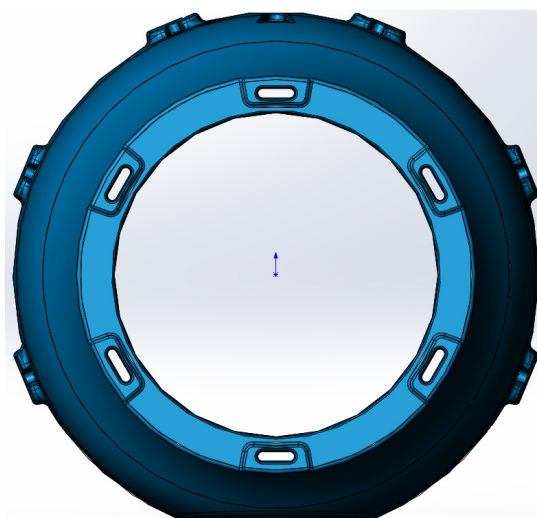


Figura 29 - Vista de local para a inserção da rede de ventilação

g. Furo de passagem para lubrificador.

Na tampa existente o furo do lubrificador é dado com um processo de maquinagem, a nova tampa de fundição. Na tampa de ventilação projetada utilizou-se um desnível que permite no macho que permite deixar o furo pronto para a utilização de lubrificador sem efetuar nenhuma execução de maquinagem.

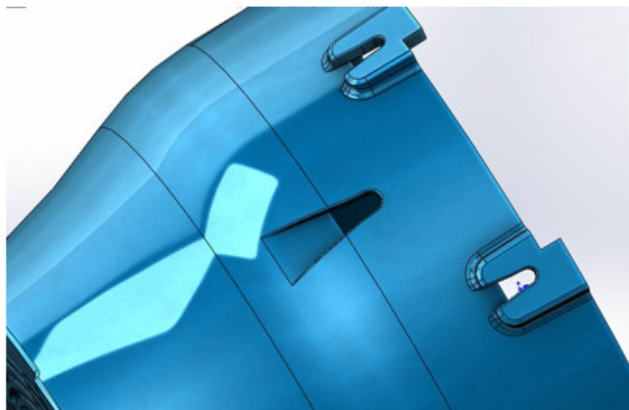


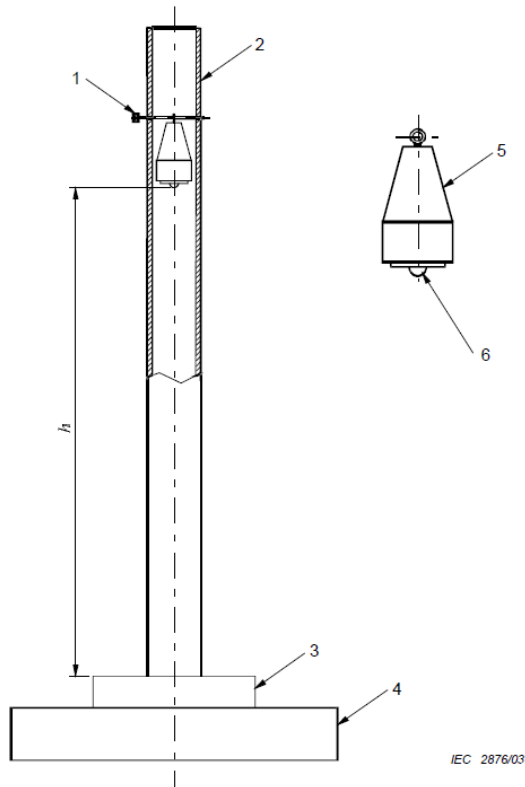
Figura 30 - Pormenor de entrada para lubrificador

1.3.2- Ensaio de impacto

Como foi referido anteriormente existe a necessidade de cumprir as normas de segurança da peça para todas as aplicações onde poderá ser utilizada. Uma das aplicações da peça é na área mineira na qual a peça necessita de prever a possibilidade de queda de objeto em cima da peça sem danificar a peça. As imagens complementares do teste de impacto encontram-se no Anexo B.

O teste de impacto que se realizou foi elaborado segundo a norma IEC60079-0. A norma refere o procedimento de ensaio e o material a utilizar.

Parte III – Caso Prático



Components

- | | |
|----------------------------------|--|
| 1 adjustment pin | 5 steel mass of 1 kg |
| 2 plastic guide tube | 6 impact head of hardened steel, 25 mm in diameter |
| 3 test piece | h height of fall |
| 4 steel base (mass ≥ 20 kg) | |

Figura 31 - Ensaio de impacto segundo a norma IEC60079

Equipment grouping	Drop height h with 1 kg mass			
	Group I		Group II or III	
Risk of mechanical danger	High	Low	High	Low
a) Enclosures and external accessible parts of enclosures (other than light-transmitting parts)	2	0,7	0,7	0,4
b) Guards, protective covers, fan hoods, cable glands	2	0,7	0,7	0,4
c) Light-transmitting parts without guard	0,7	0,4	0,4	0,2
d) Light-transmitting parts with guard having individual openings from 625 mm ² to 2 500 mm ² ; see 21.1 (tested without guard)	0,4	0,2	0,2	0,1

NOTE A guard for light-transmitting parts having individual openings from 625 mm² to 2 500 mm² reduces the risk of impact, but does not prevent impact.

Figura 32 - Tabela de altura de queda da peça segundo a norma IEC60079

Olhando para a tabela pode ser verificado que a peça deverá ser testada para a maior solicitação possível de forma a cumprir todas as normas, assim sendo a altura (h) de ensaio será 2 metros.

Antes de partir para o ensaio físico do teste de impacto foram efetuadas varias simulações computacionais de aproximação utilizando o *software* ANSYS. Os resultado obtidos apenas serviram para prever o comportamento da peça no teste de impacto.

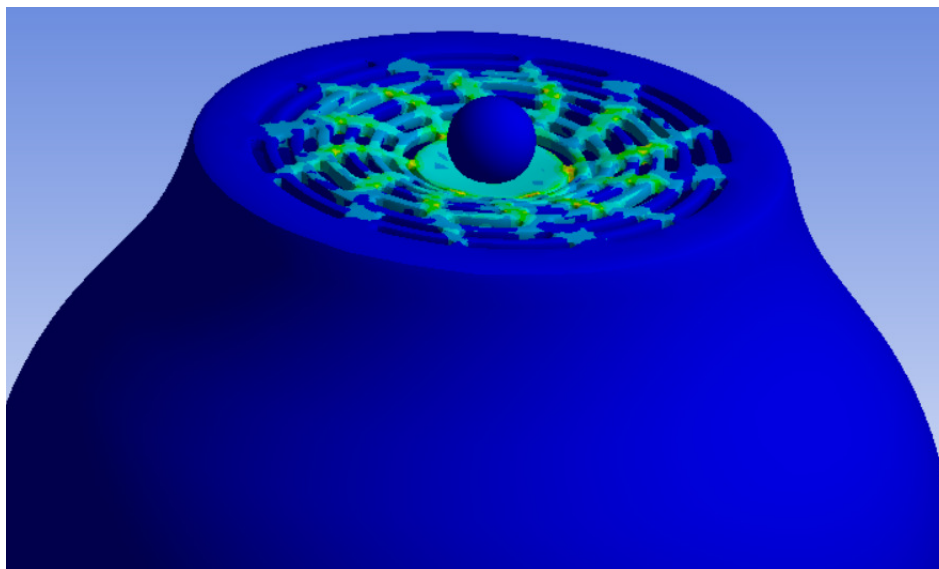


Figura 33 - Exemplo de uma das simulações efetuadas em ANSYS

Para a realização do ensaio como não esta disponível a nova peça desenvolvida foi necessário recorrer uma tampa de ventilação o mais parecida possível a peça a usar foi a que serviu de base do estudo (tampa do motor W22), ou seja um motor sem certificação mas o qual é muito semelhante a tampa de ventilação à nova tampa desenvolvida. O objeto que é deixado cair por gravidade a 2 metros de altura foi realizada internamente na empresa uma peça com as dimensões indicadas na norma.



Figura 34 - Peça de impacto utilizada no ensaio

O procedimento de ensaio consiste em deixar cair a peça na vertical sobre a tampa de ventilação e verificar se esta suporta o impacto sem partir. Para garantir que a peça cai na vertical sem existir interferência colocou-se um tubo de PVC.



Figura 35 - montagem de ensaio com o motor e o tubo

Parte III – Caso Prático

Na Figura 36 dentro do círculo pode-se observar que a peça de ensaio deixou uma pequena marca na tampa isso significa que a tampa suportou a energia de impacto de 20J o que prova que no local a referida tampa de ventilação a tampa está aprovada para IK10, no entanto é necessário efetuar este teste de impacto em toda a peça.



Figura 36 - Marca da peça após teste de impacto

Na Figura 37 a tampa de ventilação sujeita ao teste de impacto cedeu pode-se verificar que a parte central cedeu no teste de impacto, este facto é explicado com a diferença de espessura deste local da tampa para todo o resto da tampa.

Este local é menos espesso para que em algumas aplicações seja removida esta área de uma forma fácil.

Como este local da peça não passou no teste de impacto não é possível utilizar a mesma parte traseira na nova tampa projetada. Como toda a outra área da parte traseira da tampa suportou o teste de impacto a nova tampa terá uma espessura uniforme em toda ela.

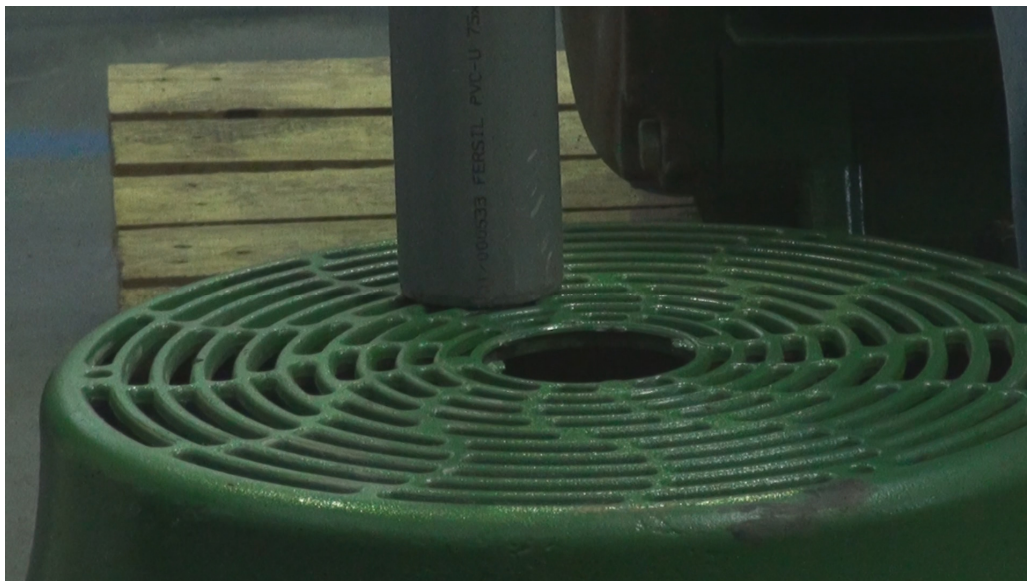


Figura 37 - local onde no teste de impacto a tampa cedeu

Quando forem fabricadas as tampas é necessário fabricar um protótipo de forma a efetuar novamente os ensaios anteriormente referidos, porque apesar do equipamento utilizado no ensaio ser semelhante podem existir alterações de comportamento importantes. Uma vez que como uma tampa contém maior área o comportamento no teste de impacto é diferente.

Após a realização do ensaio pode-se concluir que a tampa suporta o limite de impacto imposto por norma e que apenas a zona central da rede partiu, esta zona normalmente é menos espessa para que seja fácil remover o centro para a colocação de um *encoder* ou para o motor possuir duas pontas de veio. Assim sendo é possível efetuar a nova tampa de ventilação com a mesma rede apenas alterando a parte central de forma a ser reforçada.

1.3.3- Ensaio de escoamento de ar

Com o passar dos tempos a WEG foi efetuando estudos de forma a melhorar a performance de arrefecimento e de ruído do motor elétrico. O ensaio realizado ao motor para análise de características elétricas encontra-se no anexo A

Parte III – Caso Prático

Assim sendo foram efetuados estudos analíticos com o auxílio de *softwares* computacionais (nomeadamente o *ANSYS*) que permitem uma base solida de estudo

Um dos estudos mais recentes sobre arrefecimento e ruido contém um estudo da influencia da vorticidade da eficiência aerodinâmica de um motor elétrico. [19]

O ensaio de escoamento de ar desenvolvido neste capítulo é uma tentativa de validação dos ensaios computacionais que foram realizados, sendo que o produto utilizado para o ensaio não é igual ao utilizado mas tem formas semelhantes o que permite tirar algumas conclusões. Para alem do ensaio pretender validar o que já foi testado computacionalmente tenta também estudar qual o diâmetro de entrada de ar mais otimizado para os motores elétricos em analises. A expectativa de redução do ruido ao diminuir a entrada de ar é explicado com a diminuição da velocidade de saída do ar na superfície do motor e consequentes diminuição do atrito provocado pelo ar.

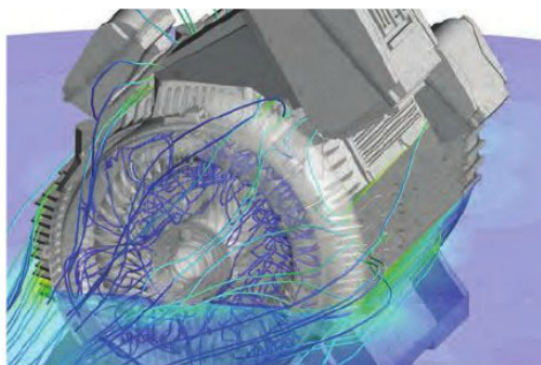


Figura 38 - Teste efetuado em ANSYS CFX [19]

Para a realização do ensaio foi necessário recorrer a uma tampa de ventilação o mais semelhante possível (tendo como principal semelhança o tamanho da entrada de ar e o formato da tampa). O formato da rede de entrada de ar foi otimizado segundo um estudo que foi realizada pelo Eng.º Cassiano



Figura 39 - Vista traseira de motor antes de ensaio

Para simular a diferença do diâmetro da entrada de ar foram utilizadas coroas em papel que eram coladas com adesivo na parte traseira da tampa.

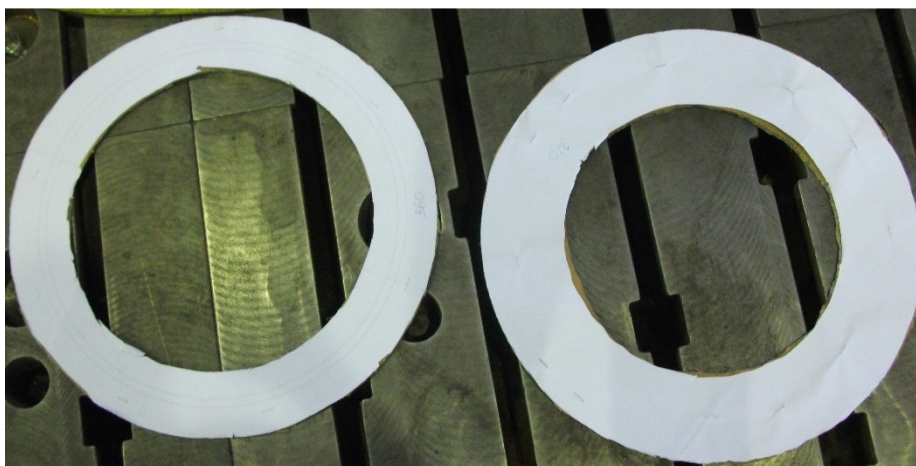


Figura 40 - Coroas para simulação da entrada de ar

No ensaio de escoamento foram realizados três ensaios com diâmetros diferentes, ensaio com o diâmetro original ($\varnothing 510mm$), ensaio com a redução de entrada de ar media ($\varnothing 360mm$), ensaio com a menor coroa ($\varnothing 320mm$).

Para a medição do ruído utilizou-se o equipamento presente na (Figura 41).

Parte III – Caso Prático

Para medir a diferença entre os arrefecimentos do motor foi utilizado como termo comparativo a velocidade do ar medida nos locais como são indicados na (Figura 42). Na medição da velocidade do ar o equipamento presente foi o que se encontra na (Figura 41).



Figura 41 - Instrumentos utilizado para medição de velocidade do ar (1) e de ruído (2)

O ruído do motor foi medido em quatro locais diferentes a ou seja na parte traseira e dianteira e em cada uma das laterais o ruído é medido a um metro de distância e a um metro de altura da base do motor, este procedimento é repetido para cada uma das montagens. Para uma correta medição do ruído seria necessário medir o ruído de fabrica e o ruído em ambiente exterior fazendo a diferença entre eles e retirando a diferença entre os dois ao ruído medido no ensaio assim era obtido o ruído do motor, no entanto como este ensaio apenas é realizado para comparar a diferença de ruído com a variação da entrada de ar pode ser utilizado o valor de ruído retirado diretamente.

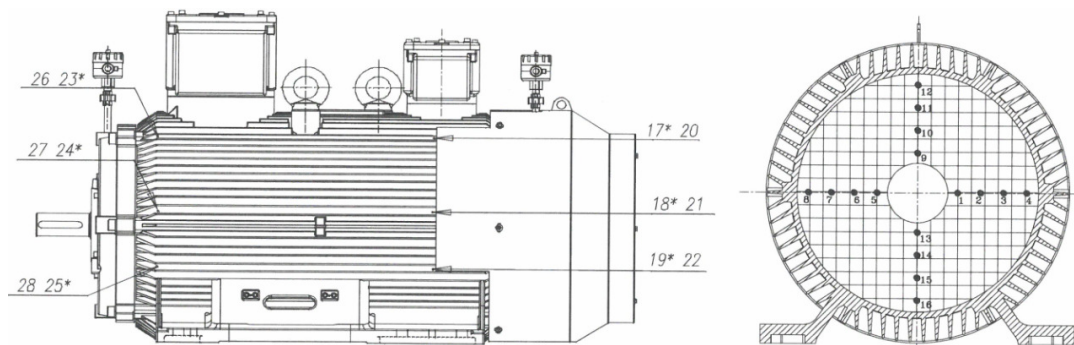


Figura 42 - Localização dos pontos de medição da velocidade do ar

Após estarem montados os motores e prontos para ensaio foram registados os valores de ruído dos motores.

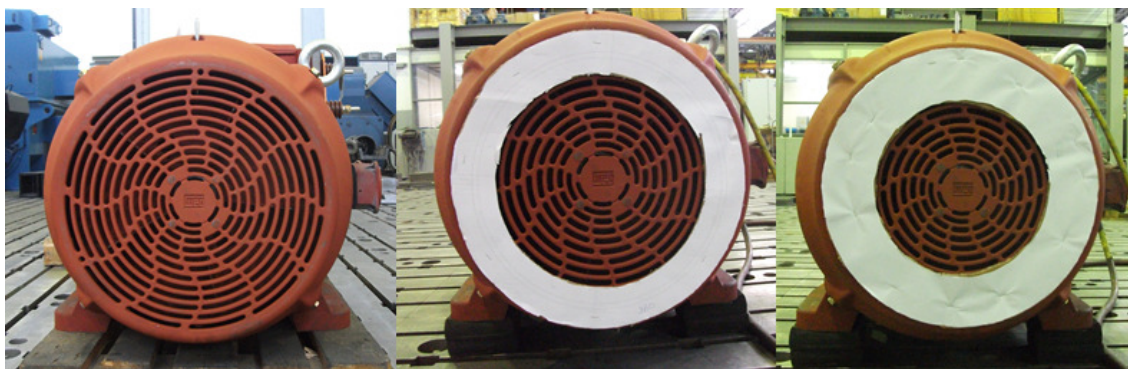


Figura 43 - Vista a partir da entrada de ar do motor

Tabela 4 – Ruído medido no ensaio

Ponto de medida	Diâmetro 510mm (dBA)	Diâmetro 360mm (dBA)	Diâmetro 320mm (dBA)
Dianteiro	76,4	75,5	75,5
Traseiro	81,5	80,5	80,3
Direita	79,5	79,4	79,2

Parte III – Caso Prático

Esquerda	81,1	79,9	79,7
----------	------	------	------

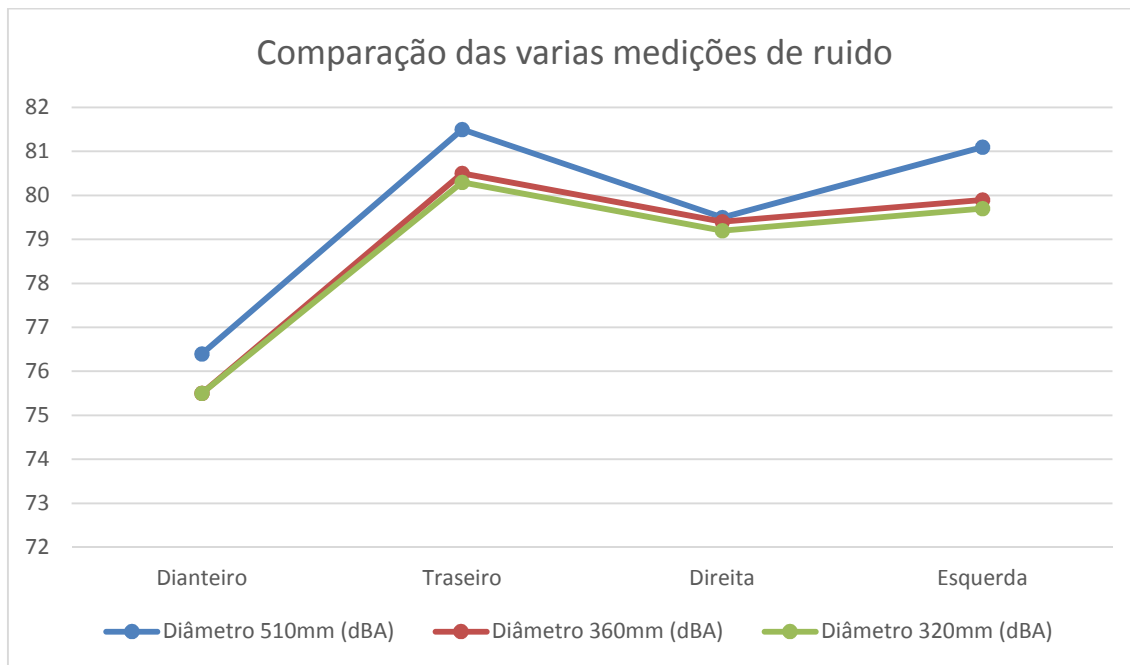


Gráfico 1 - Relação entre o ponto de medida e a variação do ruído

Ao ser analisado o gráfico pode-se denotar que existe uma grande diferença entre o diâmetro de entrada de 510mm e os outros dois daí se pode concluir que o diâmetro da entrada de ar tem uma influência direta no nível de ruído do motor.

No entanto entre os outros dois diâmetros de entrada de ar a diferença de ruído é praticamente imperceptível. Este fenómeno pode ser explicado pelo diâmetro do ventilador que está presente no motor, ou seja como foi referido anteriormente o fenómeno de vorticidade acontece quando o diâmetro da entrada de ar é superior ao ventilador, assim sendo o ventilado presente no motor em questão contém 490 milímetros de diâmetro.

O fenómeno de vorticidade ocorre quando existe ar que está que entra no ventilador e que quando projetado colide com a deslocação de ar que está presente na parte superior do ventilador como pode ser observado na imagem da direita.

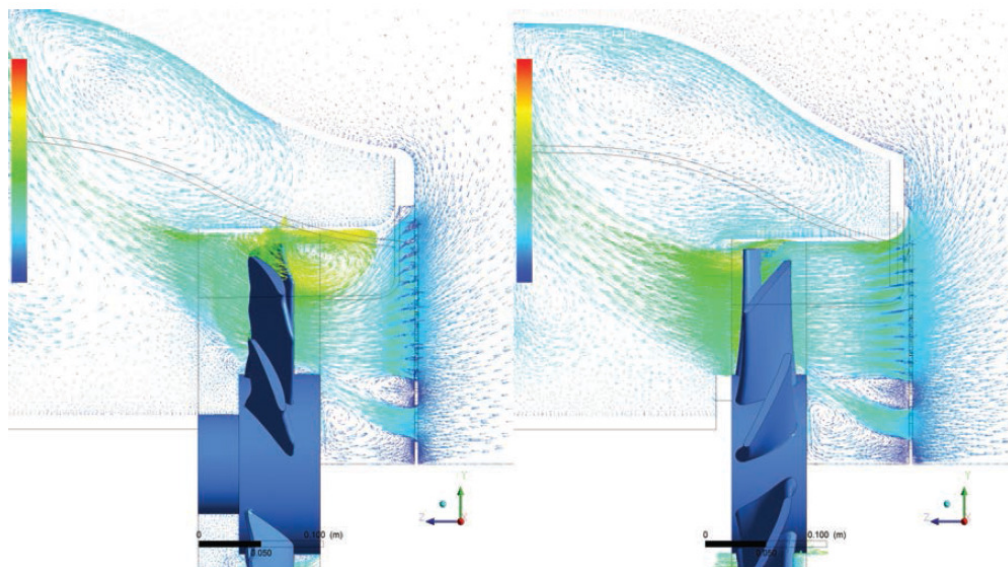


Figura 44 - Ensaio de escoamento realizado no ANSYS [19]

Por essa mesma razão será de grande interesse realizar o mesmo teste com um ventilador mais pequeno, uma vez que a entrada de ar de um ventilado virá sempre com o mesmo diâmetro.

Em cada uma das montagens foi registado também o valor de velocidade do ar nos vários pontos de medida para ser possível a comparação:

Tabela 5 - Velocidade do ar medida no ensaio

Ponto de medida	Diâmetro 510mm (m/s)	Diâmetro 360mm (m/s)	Diâmetro 320mm (m/s)
20	23,8	19,9	18,9
21	21,6	20,3	18,9
22	17,0	15,7	12,8
26	10,1	10,1	9,3
27	9,0	9,1	9,0
28	9,5	7,7	6,6

Para análise apenas se considerou a velocidade de saída de ar nas alhetas, visto que apenas se pretende verificar a diferença da velocidade que esta presente na superfície do motor.

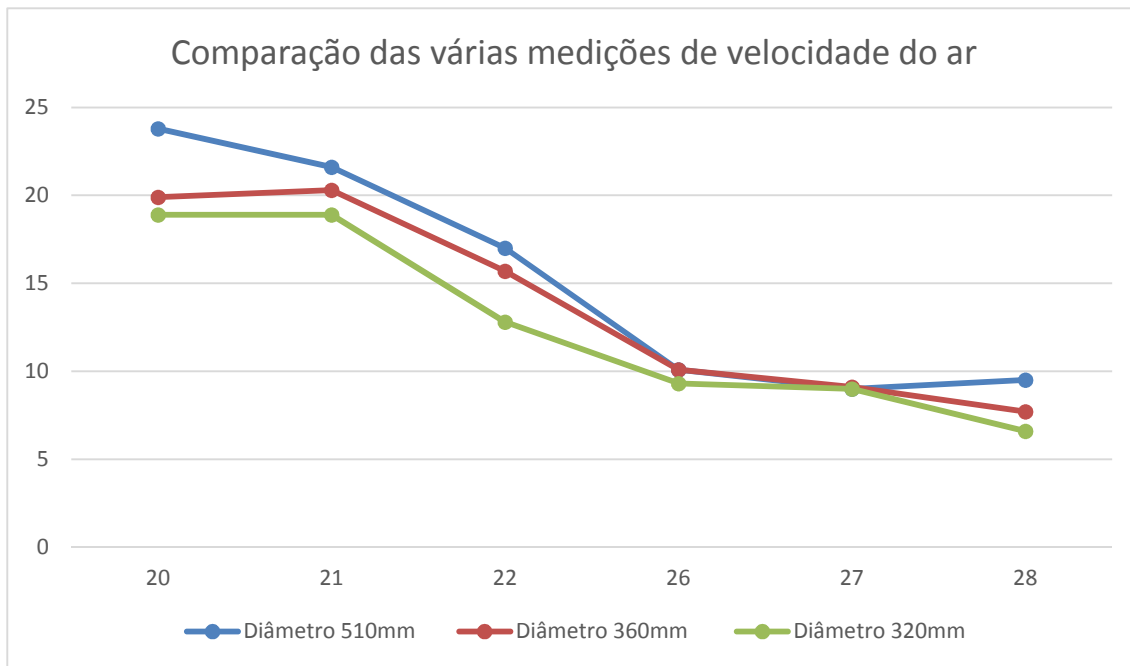


Gráfico 2 - Relação entre o ponto de medida e a variação da velocidade do ar

Ao verificar o Gráfico acima evidencia-se que quando se reduz a entrada de ar no motor existe uma diminuição da velocidade do ar, no entanto é visível que onde ocorre uma maior variação da velocidade no lado onde está a ventilação, no outro lado não existe uma variação de velocidade significativa.

Assim sendo pode-se concluir que a perda de velocidade apenas é considerada um problema nos motores que necessitem de um maior arrefecimento no lado da ventilação, ou seja sempre que se pretender testar esta solução deve existir o cuidado de verificar qual o aquecimento no lado traseiro do motor.

Apesar da variação do ruído com a variação da entrada de ar como foi visto anteriormente não ser significativa no caso apresentado quando este estudo foi realizado serviu de base para ensaios futuros, sendo que antes da conclusão da presente tese houve a necessidade de baixar o ruído de um motor esta solução foi a utilizada e após a medição do ruído nesse ensaio verificou-se uma redução significativa do ruído e que possibilitou a utilização do motor sem prejudicar a performance térmica do motor.

1.3.4- Modelo final da tampa de ventilação

Após a realização dos ensaios anteriormente descritos foi necessário realizar algumas alterações ao modelo final da tampa a apresentar:

- Colocação de uma rede semelhante à utilizada no ensaio de impacto;
- Remoção de furação na traseira da tampa de ventilação;
- Colocação de reforço para previsão de *encoder*;
- Colocação de marca WEG na parte traseira;

A colocação de uma rede de ventilação semelhante à utilizada no ensaio de impacto permite uma redução de custo na produção da rede de ventilação cumprindo também o IP20 (Índice de proteção), necessária cumprir para motores à prova de explosão segundo a norma 60079.

Também é importante frisar que a rede cumpre o IK10 (*Internacional impact*) testado no ensaio de impacto referido anteriormente.

No entanto no centro a parte central da rede de ventilação tem uma espessura uniforme em comparação com a restante rede, visto que a rede presente no teste de impacto não suportou o impacto na parte central por esta conter uma menor espessura.

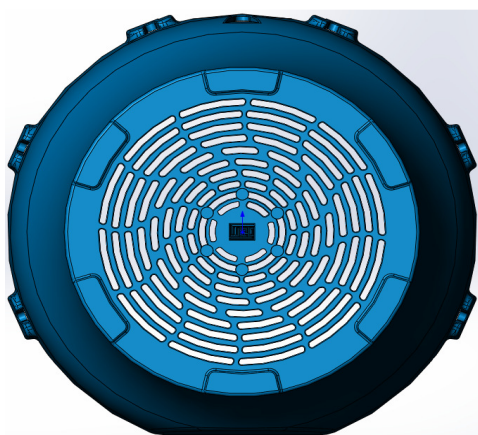


Figura 45- Vista da rede de proteção de entrada de ar do motor

Parte III – Caso Prático

Uma vez que a tampa deixou de levar uma rede amovível deixa de existir a necessidade da furação para fixar a rede, no entanto os reforços onde se encontrava presente a furação irão ser mantidos uma vez que podem ser usados no caso de um motor com ventilação forçada (IC416).

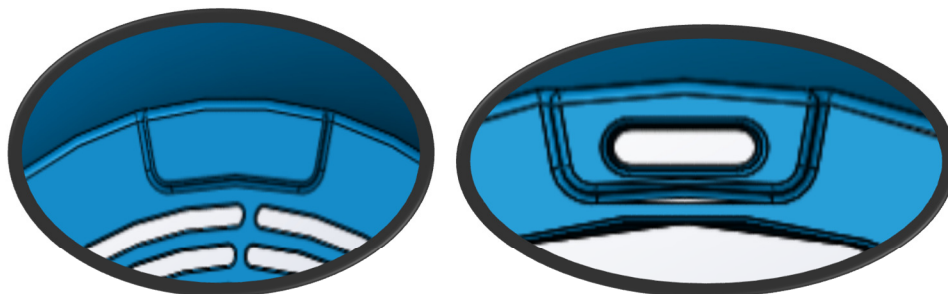


Figura 46 - Pormenor de reforço para ventilação forçada solução inicial e final

No centro da tampa de ventilação foram colocados 5 reforços que poderão ser utilizados no caso do motor utilizar *encoder*.

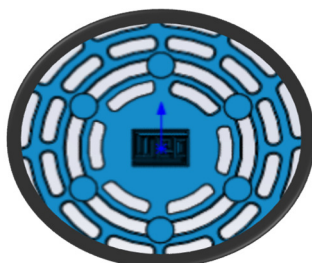


Figura 47 - Pormenor de reforços para fixação de *encoder*

Parte IV – Análise de resultados

Neste estudo foi projetada uma tampa de ventilação de um motor W22X neste mesmo estudo foi efetuada uma pesquisa dos vários produtos existentes na mesma área para obter uma boa base de estudo. A tampa estudada visa a gama de motores W22X nas alturas de eixo 315 mm, 355mm e 400mm.

Como análise inicial foram verificados os parâmetros de entrada para a execução do estudo.

Primeiro parâmetro de entrada necessidade de alterar o material de aço para ferro fundido, esta alteração permitiu uma grande redução do custo de produção da tampa de ventilação. A tampa será fundida dentro do grupo WEG na empresa mãe, local onde o ferro fundido é obtido através do reaproveitamento de chapa de e sobras de aço.

Segundo redução do número de operações de maquinagem realizadas na tampa de ventilação para a sua utilização, com o novo projeto irá permitir a fabricação da tampa já contendo os furos para a fixação necessários, furos estes que na anterior tampa eram dados na com uma operação de maquinagem.

Terceiro teste de impacto que foi realizado para aprovar a espessura do material a utilizar na peça final, este teste permitiu verificar que existia a necessidade de alterar a rede de ventilação em relação à que serviu de base, uma vez que esta não suportou o teste de impacto no centro da mesma.

Quarto parâmetro analisado foi o teste de escoamento este permitiu ter uma noção do comportamento de escoamento da futura tampa de ventilação e entender que esta não irá prejudicar o rendimento térmico nem acústico do motor, pelo contrário o teste provou que com a alteração do diâmetro da entrada de ar do motor a nova tampa de ventilação poderá equilibrar melhor o rendimento térmico e acústico do motor. No entanto deste ensaio pode-se tirar as elações que o ventilador utilizado no motor e o seu diâmetro influenciam o escoamento de ar e o diâmetro de entrada de ar.

Parte IV – Análise de resultados

Assim sendo devem ser testados vários ventiladores com vários diâmetros de entrada de ar de forma a estabelecer uma relação direta entre a entrada de ar e o ventilador, apenas após existir esta relação é possível otimizar a entrada de ar.

Quinto padronizar a peça para que esta seja utilizada em várias aplicações diferentes, para isso efetuou-se um levantamento de todas as utilizações da tampa de ventilação a solução procurada foi uma que cobre 80% dos casos, visto que para cobrir todas as aplicação iria obrigar a projetar uma peça com muitas especialidades o que iria encarecer o produto para aplicações raramente utilizadas, como tal a solução encontrada engloba motores *standard*, motores com *encoder*, motores com ventilação forçada e motores com acelerómetros.

Sexto parâmetro maior facilidade de montagem e manuseamento da tampa de ventilação quando realizado o projeto o seu *design* foi pensado para se montado com o auxílio de uma pequena grua e ser armazenado empilhado o que não acontecia de momento e existia uma ocupação de espaço no stock precioso. Para uma fácil montagem mais fácil a tampa é levantada com uma ferramenta (a ser projetada para o efeito) pelo local onde ficará o lubrificador este local é reforçado em relação a todo o resto da peça para suportar o içamento da mesma.

Parte V – Conclusões e Trabalhos futuros

1 – Conclusões

Foi efetuado um estudo dos motores fabricados na empresa que serviu de base ao desenvolvimento da nova tampa, nomeadamente, soluções existentes, tipos de materiais e processos de fabrico envolvidos.

O projeto da nova tampa teve em consideração os estudos anteriores efetuados na empresa e abordou alterações de material e processo de fabrico, alterações geométricas (forma exterior, fixações e espessura), estudo de ventilação e ensaios de impacto.

Tendo como base a tampa anterior e uma outra semelhante à pretendida foram conseguidas melhorias em vários aspetos, desde técnicos/ produtivos e económicos. Foram os seguintes:

- Ficou mais barata;
- É mais fácil montar;
- Para a utilização padrão não necessita de operações fabris;
- É uma peça de um só corpo (*Unibody*);
- Ficou padronizada a peça;
- Cumpre as normas de impostas para a utilização segundo a certificação existente;
- Mantém o nível de arrefecimento do anterior modelo;
- Maior facilidade de armazenamento com a possibilidade de empilhamento.

2 – Sugestão para trabalhos futuros

Ao longo de todo o processo de projeto da tampa de ventilação surgiram novas oportunidades de melhorias e novas ideias que por limitação de tempo e por vezes

recursos não houve oportunidade de estudá-las como tal essas mesmas ideias são apresentadas como sugestões de próximos estudos:

- Efetuar um estudo de arrefecimento com a tampa protótipo;
- Efetuar um estudo de impacto com tampa protótipo desenvolvida pela WEG;
- Efetuar um ensaio num túnel de vento para verificar possíveis melhorias de design
- Analise em ANSYS do ruído do sistema de ventilação;
- Testar ventiladores com diâmetros diferentes no teste de ruído;
- Terminar o projeto do suporte para o Kit de ventilação;
- Testar a utilização de um ventilador com véu.

Todos os tópicos apresentados como sugestões futuras pretendem favorecer os produtos a nível de custo, performance ou até processo.

De entre os tópicos apresentado o tópico que se refere ao projeto para o suporte de kit de ventilação já se encontra em realização e fase final.

Bibliografia

- [1] - <http://www.weg.net/pt/Sobre-a-WEG/Historia/Os-Fundadores>
- [2] - <http://www.mundoeducacao.com/fisica/a-historia-eletricidade.htm>
- [3] - <http://www.coe.ufrj.br/~acmq/eletrostatica.html>
- [4] - <http://www.coe.ufrj.br/~acmq/oden1.jpg>
- [5] - <http://megaarquivo.com/category/engenharia/page/14/>
- [6] -
<https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0CCwQFjAC&url=http%3A%2F%2Fsistemas.eel.usp.br%2Fdocentes%2Farcivos%2F5840834%2F59%2FHistoriamotoreseletricos.doc&ei=adVMVJWwIJXgarfmgLAI&usq=AFQjCNFLmmlYdByR8yPWLvbjKHxYWj3Huw&sig2=8kKyP6OWKfUZ8IWn61E7SA&bvm=bv.77880786,d.d2s>
- [7] - <http://www.eti.kit.edu/english/1376.php>
- [8] - http://www.ebah.pt/content/ABAAAA3_wAB/gerador-corrente-continua
- [9] - <http://www.joomag.com/magazine/a-historia-das-maquinas-marccedilo-2014/0224314001396131899?page=34>
- [10] - <http://www.motoeletrica.srv.br/produtos/pecas/#!prettyPhoto>
- [11] - http://megrep.com.br/mat_rebobinagem.php
- [12] - <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/magazine/2014/Issue.2/ANSYS-Advantage-Volume-8-Issue-2---Multiphysics/ANSYS-Advantage-Volume-8-Issue-2---Multiphysics/index.html#?page=14>
- [13] - <http://www.mspc.eng.br/ciemat/aco240.shtml>

- [14] - <http://www3.fsa.br/mecanica/arquivos/02%20Fundição.pdf>
- [15] - <http://www.sinto.com.br/pt/nfe/pdf-produtos/fundicao.pdf>
- [16] - <http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo6/Fundicao.pdf>
- [17] - <http://www.infoescola.com/quimica/fundicao/>
- [18] - http://www.ebah.com.br/content/ABAAAq_0AC/conformacao-plasticas-dos-metais
- [19] - <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/magazine/2014/Issue.2/ANSYS-Advantage-Volume-8-Issue-2---Multiphysics/ANSYS-Advantage-Volume-8-Issue-2---Multiphysics/index.html>
- [20] - <http://segurancaonline.com/gca/?id=920>
- [21] - http://www.siemens.com/history/en/news/electric_railway.htm
- [22] - <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-avancos-tecnologicos-nos-motores-eletricos-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>
- [23] - <http://avariasnummotordeinducacao.blogspot.pt>
- [24] - http://www.dee.ufrn.br/~luciano/arquivos/ins_ele/Apre_2008_1/Felipe%20Melo/ENCODER-Apresenta%25e7%25e3o%201-Felipe.pdf
- [25] - <http://norbertocefetsc.pro.br/downloads/fundicao.pdf>
- [26] - http://www.etepiracicaba.org.br/cursos/apostilas/mecanica/3_ciclo/tecnologia_mecanica.pdf
- [27] - ftp://ftp.cefetes.br/cursos/MetalurgiaMateriais/AndreItman/CONFORMA%C7%C3O%20%20%20Mec%E2nica_Agosto%202010.pdf

[28] - <http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840793/LOM3004/Aula1CM.pdf>

[29] -

http://www.ocw.unicamp.br/fileadmin/user_upload/cursos/EM730/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS_1.pdf

[30] -

ftp://ftp.cefetes.br/cursos/EngenhariaMetalurgica/Marcelolucas/Disciplinas/Conformacao/Apostila_Conformacao_dos_Metals_fund_e_aplicacao.pdf

Anexo A

Anexo A – Relatório de Ensaio de aquecimento realizado

55AB4 250 kW 6000 V 50 Hz nº1432377601

F.C.10746 Ens.16072

RELATÓRIO DE ENSAIO

Motor tipo	<i>355AB4</i>
Potência	<i>250 kW</i>
Velocidade	<i>1500 RPM</i>
Tensão	<i>6000 V</i>
Frequência	<i>50 Hz</i>
Nº Motor	<i>1432377601</i>
Normas	<i>IEC 34-2-1</i>

Cliente *WEG GERMANY GMBH*

Encomenda do Cliente

Conf. Enc. *33367701*

Referência *F.C.10746 Ens.16072*

Ensaio tipo P.E. com patela 320mm ; F.S. 1.15

Data de ensaio : *25-08-2014*

Emitido em: *25-08-2014*

Emitido por: *Abel e Fábio*

1 RESULTADOS DE ENSAIO E DETERMINAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS

1.1 Medida da resistência de enrolamentos

Resistência estatórica

$R_{U-W} =$	1.492 Ω	$R_{fase} =$	0.7467 Ω
$R_{U-V} =$	1.495 Ω	$R_{fase\ 20^\circ} =$	0.7343 Ω
$R_{V-W} =$	1.494 Ω		
$R_{méd} =$	1.493 Ω	$R_{ref} =$	1.901 Ω
Desv máx=	0.1038 %		

Resistência rotórica

$R_{K-M} =$	na Ω	$R_{fase} =$	na Ω
$R_{K-L} =$	na Ω	$R_{fase\ 20^\circ} =$	na Ω
$R_{L-M} =$	na Ω		
$R_{méd} =$	na Ω	$R_{ref} =$	na Ω
Desv máx=	#DIV/0! %		

Temperatura ambiente: 24.3 °C

Temp. de referência: 95.0 °C

1.2 Determinação do aquecimento

Aquecimento Estatórico

Aquecimento Rotórico

$T_{0.6\ s}$	Rq	Rq-Rf	θ	$T_{0.6\ s}$	Rq	Rq-Rf	θ
0	1.919 Ω	0.4272 Ω	72.4 K		na	na	
86	1.914 Ω	0.4225 Ω	71.6 K		na	na	
100	1.912 Ω	0.4202 Ω			na	na	
120	1.911 Ω	0.4188 Ω			na	na	
140	1.909 Ω	0.4175 Ω			na	na	
160	1.908 Ω	0.4162 Ω			na	na	
180	1.907 Ω	0.4152 Ω			na	na	
200	1.906 Ω	0.4138 Ω			na	na	
220	1.905 Ω	0.4128 Ω			na	na	
240	1.903 Ω	0.4115 Ω			na	na	
260	1.902 Ω	0.4102 Ω			na	na	

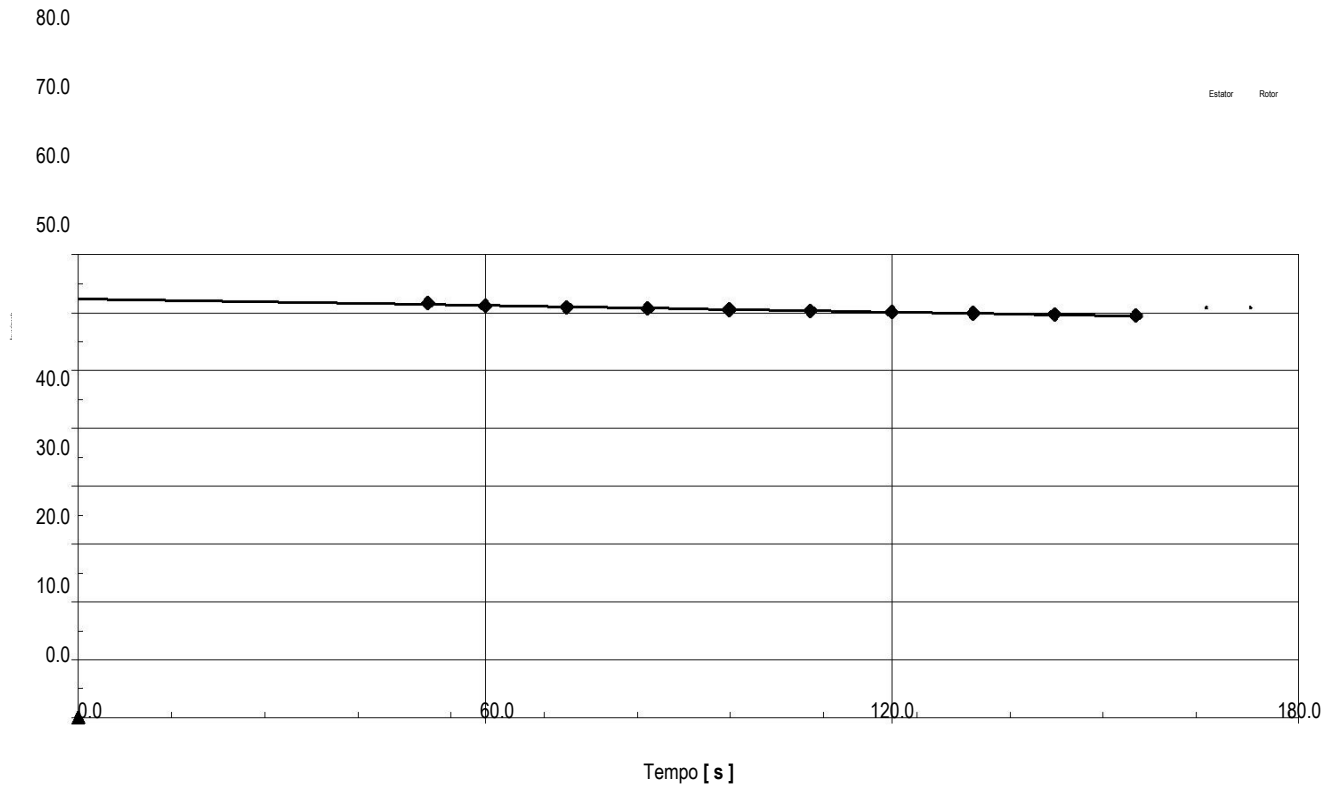
1.2.1 Carga durante ensaio de aquecimento

I	P_{abs}	T	n	f	s	T_{amb}
33.07 A	296.5 kW	1823 Nm	1488 RPM	49.939 Hz	0.6468 %	26 °C

Anexo A – Relatório de Ensaio de aquecimento realizado

1.2.2 Aquecimento corrigido:

	Aquecimento Estático	Aquecimento Rotórico
Perdas internas globais	60.5 K	na
Perdas Joule	57.6 K	na
Perdas internas ponderadas	59.7 K	na



1.3 Determinação da corrente e binário de arranque

1.3.1 Ensaio com o rotor bloqueado

	%U _N	U	I _{st}	I _{st} / I _N	W _{st}	T _{st}	T _{st} / T _N
Y	7%	400 V	6.296 A	0.2	294.5 W	-17.2 Nm	0.0
Y	13%	800 V	17.33 A	0.6	5047 W	12.1 Nm	0.0
Y	20%	1200 V	28.76 A	1.0	14700 W	65.3 Nm	0.0
Y	27%	1600 V	40.57 A	1.4	29250 W	142.6 Nm	0.1
Y	33%	2000 V	52.77 A	1.8	48700 W	243.9 Nm	0.2
Y	40%	2400 V	65.36 A	2.2	73040 W	369.2 Nm	0.2
Y	47%	2800 V	78.34 A	2.7	102300 W	518.5 Nm	0.3
Y	53%	3200 V	91.71 A	3.1	136400 W	691.8 Nm	0.4
Y	60%	3600 V	105.5 A	3.6	175500 W	889.2 Nm	0.6
Y	67%	4000 V	119.6 A	4.1	219400 W	1110.5 Nm	0.7

1.3.2 Método Japonês (método descrito na norma JEC-37 1979 pág.67,68 §9)

	V	A	W	Nm	Ranhura fechada	Ranhura aberta
2 x I _n	2154.2	58.6	57500	289	$\alpha = 1.18656$	$\gamma_1 = 1.19407$
1.5 x I _n	1686.8	43.9	33050	163	$\beta = 1.18059$	$\gamma_2 = 1.17614$
I _n	1201.1	29.3	14731	65	$I_{st} = 195.6 A$	$\gamma = 1.1733$
					$T_{st} / T_N = 2.3$	$I_{st} = 202.7 A$
						$T_{st} / T_N = 2.4$

Rotor de ranhura fechada

	U	I _{st}	I _{st} / I _N	W _{st}	T _{st}	T _{st} / T _N
Y Un	6000.0 V	195.6A ±5%*	6.7		3638.4 Nm	2.3
Y Un-15%	5100.0 V	161.5A ±5%*	5.5		2478.9 Nm	1.5

* conforme descrito na norma JEC-37 1979 pág.111 §15

Anexo A – Relatório de Ensaio de aquecimento realizado

1.3.3 Extrapolação polinomial com os primeiros 26 pontos

	6	5	4	3	2	U	const	Erro	$\Sigma \delta $	$\sqrt{\Sigma\delta^2}$		
	U	U	U	U	U	U	const	r	standard	$\delta_{\text{máx.}}$	n	n
$I(U) =$					1.2E-06	0.02659	-4.42825475	0.99996	0.21915	0.79%	0.29%	0.37%
$T(U) =$					7.5E-05	-0.0169	-22.4468864	0.99975	5.4649	51.09%	-27.37%	116.01%
$P(U) =$					0.01531	-6.4897	441.051924	0.9999	678.638	23.53%	2.61%	5.56%

	U	I _{st}	I _{st} / I _N	W _{st}	T _{st}	T _{st} / T _N
Y Un	6000.0 V	199.6 A	6.8	512612.5 W	2577.5 Nm	1.6
Y Un-15%	5100.0 V	163.3 A	5.6	365520.3 W	1843.1 Nm	1.2

1.3.4 Extrapolação pela função y=axb

$$I(U) = 0.005583 U^{1.206}$$

$$T(U) = 0.00000009284 U^{2.828}$$

$$T(I) = 0.01757 U^{2.351}$$

	U	I _{st}	I _{st} / I _N	W _{st}	T _{st}	T _{st} / T _N
Y Un	6000.0 V	200.3 A	6.8	4495 W	4495 Nm	2.8
		200.3 A	6.8	4528 W	4528 Nm	2.8
Y Un-15%	5100.0 V	164.6 A	5.6	2839 W	2839 Nm	1.8

Anexo A – Relatório de Ensaio de aquecimento realizado

Determinação de características a partir do ensaio com o rotor bloqueado

Determination of locked rotor characteristics

Tensão de curto-circuito:	1 269 V	Binário Máximo:	4 403 Nm	Deslizamento para o Bin. Máx.:	3.51 %
<i>Short circuit voltage</i>		<i>Pull-out torque</i>	2.8 (Bm/Bn)	<i>Slip at maximal torque</i>	
Corrente de arranque:	195.6 A	Binário de arranque:	2 578 Nm	Factor de Potência no arranque:	0.25
<i>Starting current</i>	6.7 (Ia/In)	<i>Starting torque</i>	1.6 (Ba/Bn)	<i>Starting power factor</i>	

Aquecimento

<i>Temperature rise</i>	Enrolamento Estático	Enrolamento Rotórico
	<i>Stator winding</i>	<i>Rotor winding</i>
Aquecimento medido no ensaio:	72.4 K	na
<i>Measured temperature rise</i>		

Aquecimento

<i>Temperature rise</i>	IEC34 2	IEC34 2-1	IEEE 112
	<i>Stator winding</i>		
Aquecimento medido no ensaio:	72.4K	72.4K	72.4 K
<i>Measured temperature rise</i>			
Aquecimento corrigido:			
<i>Corrected temperature rise</i>			
- Perdas internas globais:	60.7K	60.5K	60.6 K
<i>Sum of iron and (I2) losses</i>			
- Perdas Joule:	56.8K	57.6K	56.6 K
<i>(I2) losses</i>			
- Perdas internas ponderadas	59.6K	59.7K	59.4 K
<i>Weighted iron and (I2) losses</i>			

Anexo B

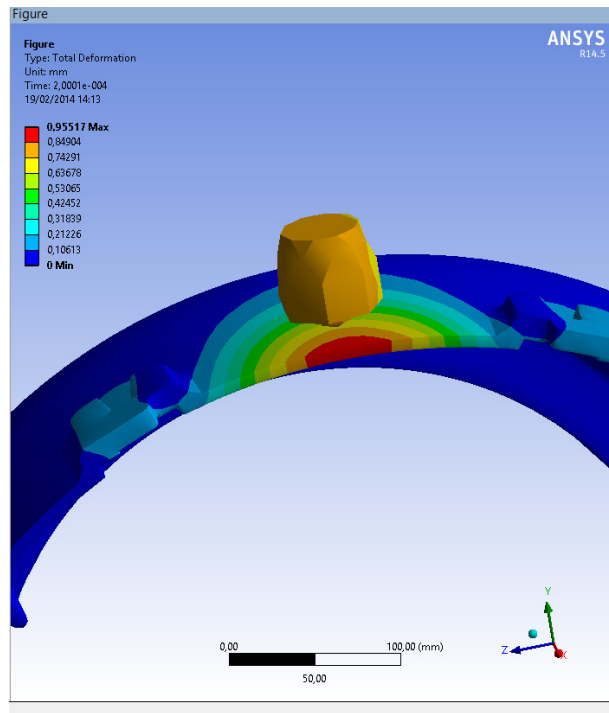


Figura 48 - Teste de impacto para verificar zona de impacto [Ilustração do autor]

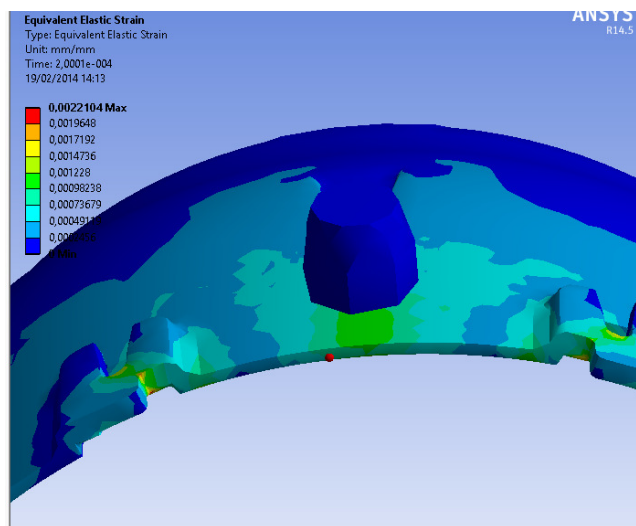


Figura 49 - Teste de impacto verificação de local mais frágil [Ilustração do autor]

Anexo B – Montagens de ensaio de apoio e Pré-formas do Projeto

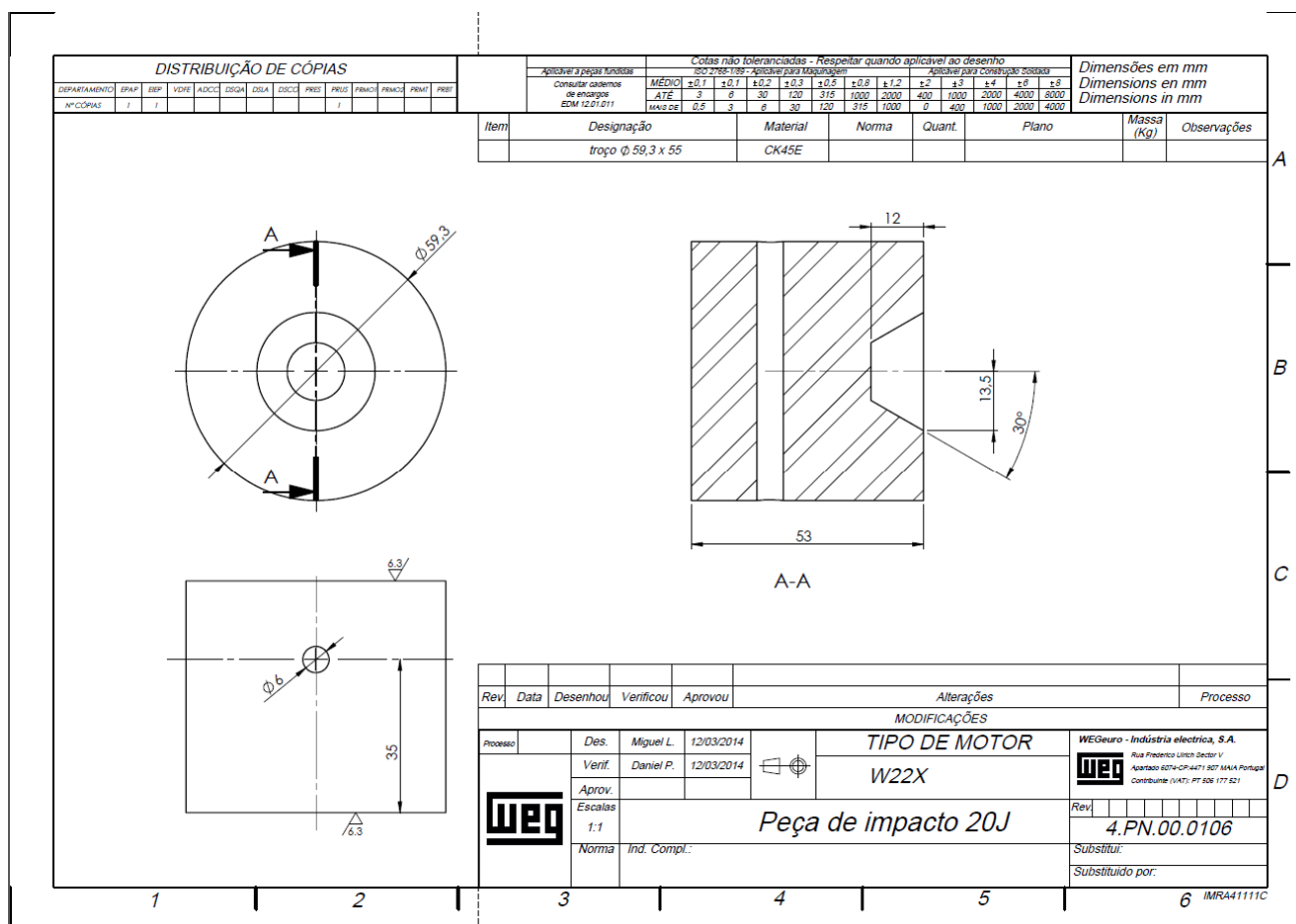


Figura 50 - Peça utilizada para realizar teste de impacto [Ilustração do autor]

