



AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA VIDA ÚTIL DE UMA FERRAMENTA UTILIZADA NUMA EMPRESA DE MOTORES ELÉTRICOS ATRAVÉS DA FILOSOFIA SIX SIGMA

CATARINA PEIXOTO NEVES

novembro de 2021

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA VIDA ÚTIL DE UMA FERRAMENTA UTILIZADA NUMA EMPRESA DE MOTORES ELÉTRICOS ATRAVÉS DA FILOSOFIA *SIX SIGMA*

Catarina Peixoto Neves
1161092

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA VIDA ÚTIL DE UMA FERRAMENTA UTILIZADA NUMA EMPRESA DE MOTORES ELÉTRICOS ATRAVÉS DA FILOSOFIA *SIX SIGMA*

Catarina Peixoto Neves
1161092

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor José Carlos Vieira de Sá, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto e coorientação do Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva e do Professor Doutor Raul Duarte Campilho do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor António Manuel da Silva Amaral

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Mestre/ Especialista José Carlos Vieira de Sá

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Coorientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Raul Duarte Campilho

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor António Mário Henriques Pereira

Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Leiria

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor José Sá e coorientadores professor Francisco Silva e professor Raul Campilho por toda a dedicação, compreensão e apoio nos momentos mais desafiantes da elaboração da presente dissertação.

Ao professor Armando Campos pela ajuda e contribuição de conhecimentos que suportaram esta dissertação.

À WEG S.A. pela oportunidade de estágio e pela excelente receção e integração na organização. Um agradecimento muito especial à Sandra, ao André, ao Álvaro e à Daniella pela disponibilidade notória e dedicação.

Ao Alex, à Thong, à Sonia, à Caterina e à Teresa por me terem acompanhado num dos períodos mais desafiantes da minha vida académica e por me terem proporcionado momentos que recordarei com muito carinho.

À minha família, um agradecimento por todo o esforço e investimento na minha educação. À minha irmã, por todas as palavras de esperança e apoio incondicional. À minha avó, a quem dedico este trabalho.

PALAVRAS CHAVE

Indústria de Motores Elétricos; Motores Trifásicos; Ferramentas da Qualidade; *Six Sigma*; *DMAIC*.

RESUMO

Atualmente, as empresas têm vindo a enfrentar períodos cada vez mais desafiantes. Devido à notória globalização de mercados, alterações de padrões de consumo dos clientes e maiores exigências de clientes existe a necessidade das indústrias de inovar constantemente e ter um foco incessante na melhoria da qualidade dos seus processos. Verifica-se que cada vez mais empresas têm vindo a recorrer a filosofias de *Problem-Solving* com o objetivo de melhorar a qualidade dos seus processos e produtos. A filosofia *Six-Sigma* é um exemplo de filosofias de *Problem-Solving*.

O presente caso de estudo foi desenvolvido em ambiente industrial, no grupo empresarial WEG S.A. O objetivo do caso de estudo foi o aumento da vida útil de uma ferramenta utilizada na indústria de motores elétricos através da aplicação da filosofia *Six-Sigma*. Implementou-se a abordagem *DMAIC* que permitiu a utilização de várias ferramentas e técnicas da qualidade e da estatística. Na abordagem referida, foram efetuadas três análises a sistemas de medição, uma análise DOE e foi incorporada uma análise de elementos finitos. Foram estudadas e testadas várias sugestões de melhoria. Foi criado um plano de implementação composto pela alteração da ferramenta de inserção de estatores. A nova ferramenta, através da análise FEA, mostrou-se mais robusta e capaz de garantir o aumento da sua vida útil.

KEYWORDS

Electric Motors Industry; Electric Motors; Quality Tools; Six Sigma; DMAIC.

ABSTRACT

Nowadays, companies are facing increasingly challenging periods. Due to the notorious markets globalization, changes in customer consumption patterns and greater customer demands, there is a need for industries to constantly innovate and have a relentless focus on improving the quality of their processes. It appears that more and more companies have been using Problem Solving methodologies with the aim of improving the quality of their processes and products. The Six-Sigma methodology is an example of Problem-Solving methodologies.

The present case study was developed in an industrial environment, in WEG S.A. group. The objective of the case study was to increase the useful life of a tool used in the electric motors industry through the application of the Six-Sigma methodology. The DMAIC approach was implemented, which allowed the use of various quality and statistical tools and techniques. In the referred approach, three analyses of measurement systems were carried out, a DOE analysis and a finite element analysis was incorporated. An implementation plan was defined, comprising the alteration of the stator insertion tool. The improved tool, through FEA analysis, proved to be more robust and capable of guaranteeing an increase in its useful life.

LISTA DE ABREVIATURAS, UNIDADES E SÍMBOLOS

Lista de Abreviaturas

AC	<i>Alternating current</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
DC	<i>Direct current</i>
DMAIC	<i>Define, Measure, Analyse, Improve and Control</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
f.e.m.	Força eletromotriz
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCI	Linha de controlo inferior
LCS	Linha de controlo superior
MSA	<i>Measurement System Analysis</i>
PME	Pequenas e medias empresas
PPM	Partes por milhão
SIPOC	<i>Supplier, Input, Process, Output, Customer</i>
SMED	<i>Single Minute Exchange of Die</i>
SPC	<i>Statistical Process Control</i>

Lista de Unidades

J	Joule
kg	Quilograma
m	Metro
N	Newton
Pa	Pascal
s	Segundo
W	Watt

Lista de Símbolos

°	Graus
°C	Graus Celsius
K	Graus Kelvin
\$	Dólares
%	Percentagem
€	Euro
σ	Sigma
α	Coefficiente de expansão térmica

μ	Coeficiente de atrito
δ	Aperto
E	Módulo de Young
U	Coeficiente de Poisson

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - UNIDADES INDUSTRIAIS WEG S.A – ADAPTADO (WEG, 2021B)	5
FIGURA 2 - TIPOS DE MOTORES ELÉTRICOS	9
FIGURA 3 - CONSTITUINTES DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM ROTOR EM GAIOLA- ADAPTADO (WEG, 2021A)	11
FIGURA 4 - CAMPO MAGNÉTICO E CORRENTE NO ROTOR – ADAPTADO (FRANCISCO, 2006)	11
FIGURA 5 - FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM ROTOR EM GAIOLA	12
FIGURA 6 - ANÁLISE DE MERCADO GLOBAL DE MOTORES ELÉTRICOS - POR TIPO DE MOTOR- ADAPTADO (VIVEK <i>ET AL.</i> , 2019)	13
FIGURA 7 - ANÁLISE DE MERCADO GLOBAL DE MOTORES ELÉTRICOS - POR ÁREA DE APLICAÇÃO- ADAPTADO (VIVEK <i>ET AL.</i> , 2019)	13
FIGURA 8 - EXEMPLOS DE AJUSTAMENTOS "FURO BÁSICO" (MORAIS, 2015)	14
FIGURA 9 - FERRAMENTAS UTILIZADAS NA METODOLOGIA ILEANDMAIC (FERREIRA <i>ET AL.</i> , 2019)	19
FIGURA 10- INTERFACE ENTRE ISO9001:2015 E FERRAMENTAS E METODOLOGIAS <i>LEAN SIX SIGMA</i> (SÁ <i>ET AL.</i> , 2020)	20
FIGURA 11 - CARTA DE CONTROLO – ADAPTADO (SHAH <i>ET AL.</i> , 2010)	21
FIGURA 12 - DIAGRAMA ISHIKAWA (MEINRATH & SCHNEIDER, 2007)	23
FIGURA 13 - FERRAMENTA SIPOC - ADAPTADO(BUSINESS AUDIT COMPLIANCE, N.D.)	25
FIGURA 14 - MAPA DE RACIOCÍNIO	34
FIGURA 15 - FERRAMENTA DE INSERÇÃO DE ESTADORES EM CARÇAÇAS DE MOTORES ELÉTRICOS	35
FIGURA 16 - GRÁFICO DE PRESSÃO / FORÇA DA PRENSA HIDRÁULICA	36
FIGURA 17 - OVALIZAÇÃO DA FERRAMENTA	37
FIGURA 18 - DIMINUIÇÃO DA ESPESSURA DA FERRAMENTA	37
FIGURA 19 - GASTOS ACUMULADOS NA AQUISIÇÃO DE FERRAMENTAS 2017 - 2021	38
FIGURA 20 - GASTOS ANUAIS DE AQUISIÇÃO DE FERRAMENTAS – POR TIPO DE FERRAMENTA	38
FIGURA 21 - EVOLUÇÃO DO CUSTO MÉDIO UNITÁRIO DE FERRAMENTA DE 2017 A 2021	39
FIGURA 22 - EVOLUÇÃO DO CUSTO UNITÁRIO DE CADA TIPO DE FERRAMENTAS - 2017 A 2021	39
FIGURA 23 - FERRAMENTA SIPOC - PROCESSO DE INSERÇÃO DE ESTADORES EM CARÇAÇAS	40
FIGURA 24 - PROJECT CHARTER	41
FIGURA 25 - QUANTIDADE DE FERRAMENTAS DANIFICADAS E SUCATEADAS - MARÇO A MAIO DE 2021	41
FIGURA 26 - % FERRAMENTAS DANIFICADAS E SUCATEADAS - MARÇO A MAIO DE 2021	42
FIGURA 27 - PARETO DE FERRAMENTAS DANIFICADAS	42
FIGURA 28 - 5 WHY'S DO PROBLEMA DE ELEVADA NECESSIDADE DE SUBSTITUIÇÃO DE FERRAMENTA	43
FIGURA 29 - FORÇA DE ATRITO ENTRE O ESTATOR E CARÇAÇA	44
FIGURA 30 - ZONA DE APLICAÇÃO DE VASELINA - CONDIÇÃO <i>STANDARD</i>	46
FIGURA 31 - CARTAS DE CONTROLO - μ DAS CONDIÇÕES INICIAIS	48
FIGURA 32 - MAPA DO PROCESSO DE INSERÇÃO DE ESTADORES EM CARÇAÇAS	49
FIGURA 33 - DIAGRAMA DE ISHIKAWA - COEFICIENTE DE ATRITO ELEVADO	50
FIGURA 34 - ÁRVORE DE AMOSTRAGEM MSA DIÂMETRO INTERNO DE CARÇAÇAS	52
FIGURA 35 - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DIÂMETRO INTERNO DE CARÇAÇAS	53

FIGURA 36 - ANÁLISE DE DISCRIMINAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DIÂMETRO INTERNO DE CARÇAÇAS	53
FIGURA 37 - ANÁLISE DE REPRODUTIBILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DIÂMETRO INTERNO DE CARÇAÇAS	54
FIGURA 38 - CÁLCULO DE COMPONENTES DE VARIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DIÂMETRO INTERNO DE CARÇAÇAS	54
FIGURA 39 - ANÁLISE DE REPETIBILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DIÂMETRO INTERNO DE CARÇAÇAS	55
FIGURA 40 - ÁRVORE DE AMOSTRAGEM MSA DIÂMETRO EXTERNO DE ESTADORES	55
FIGURA 41 - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DIÂMETRO EXTERNO DE ESTADORES	56
FIGURA 42 - ANÁLISE DE DISCRIMINAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DIÂMETRO EXTERNO DE ESTADORES	56
FIGURA 43 - ANÁLISE DE REPRODUTIBILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DIÂMETRO EXTERNO DE ESTADORES	57
FIGURA 44 - CÁLCULO DE COMPONENTES DE VARIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DIÂMETRO EXTERNO DE ESTADORES	57
FIGURA 45 - ANÁLISE DE REPETIBILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DIÂMETRO EXTERNO DE ESTADORES	58
FIGURA 46 - ÁRVORE DE AMOSTRAGEM MSA TEMPERATURA DE CARÇAÇAS	58
FIGURA 47 - ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DE CARÇAÇAS	59
FIGURA 48 - ANÁLISE DE DISCRIMINAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DE CARÇAÇAS	59
FIGURA 49 - ANÁLISE DE REPRODUTIBILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DE CARÇAÇAS	60
FIGURA 50 - CÁLCULO DE COMPONENTES DE VARIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DE CARÇAÇAS	60
FIGURA 51 - ANÁLISE DE REPETIBILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DE CARÇAÇAS	61
FIGURA 52 - PROPOSTAS DE MELHORIAS - FASE <i>IMPROVE</i>	61
FIGURA 53 - POSIÇÃO DE APLICAÇÃO DE PRODUTO - ANÁLISE DOE	65
FIGURA 54 - ÁRVORE DE AMOSTRAGEM DA ANÁLISE DOE	65
FIGURA 55 - GRÁFICO <i>OVERLAY PLOT</i> – ANÁLISE PRÁTICA	67
FIGURA 56 - GRÁFICO <i>REGRESSION PLOT</i> E <i>SCALED ESTIMATES</i> - ANÁLISE GRÁFICA	68
FIGURA 57 - GRÁFICO <i>PREDICTION PROFILER</i> - FASE METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	69
FIGURA 58 - GRÁFICOS <i>VARIABILITY CHART</i> - FASE METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	69
FIGURA 59 - GRÁFICO <i>VARIABILITY CHART</i> - VALIDAÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL	70
FIGURA 60 - FUNÇÃO DOS OLHAIS - AUXÍLIO NO TRANSPORTE DA CARÇAÇA	71
FIGURA 61 - POSICIONAMENTO DA CARÇAÇA NO ESTATOR	72
FIGURA 62 - ÁRVORE DE AMOSTRAGEM DA ANÁLISE AOS BLOCOS DE OLHAIS	73
FIGURA 63 - GRÁFICO <i>VARIABILITY CHART</i> - - TESTE DE CAIXA DE OLHAIS	74
FIGURA 64 - PROBLEMA DE RESINA ACUMULADA NA SUPERFÍCIE DE CONTACTO ENTRE O ESTATOR E A FERRAMENTA	75
FIGURA 65 - ÁRVORE DE AMOSTRAGEM DA ANÁLISE À FERRAMENTA PROTETORA DE RESINA	77
FIGURA 66 - <i>VARIABILITY CHART</i> - TESTE DE FERRAMENTA PROTETORA DE RESINA	78

FIGURA 67 - EMPENO DA FERRAMENTA PROTETORA DE RESINA	78
FIGURA 68 - DIMENSÕES DA BASE DA ESTUFA DE AQUECIMENTO	82
FIGURA 69 - ÁRVORE DE AMOSTRAGEM DA ANÁLISE DE AQUECIMENTO DE CARÇAÇAS	83
FIGURA 70 - PRINCIPAIS COMPONENTES DA FERRAMENTA DE INSERÇÃO DE ESTATOR EM CARÇAÇA	84
FIGURA 71 - ZONA DE FIXAÇÃO DA FERRAMENTA ATUAL	85
FIGURA 72 - DETALHES DA FORÇA E ÁREA DE APLICAÇÃO NA FERRAMENTA ATUAL	86
FIGURA 73 - DETALHES DA MALHA <i>CURVATURE-BASED MESH</i> DA FERRAMENTA ATUAL	87
FIGURA 74 - ANÁLISE DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES DA FERRAMENTA ATUAL	87
FIGURA 75 - ANÁLISE DE DESLOCAMENTOS RESULTANTES DA FERRAMENTA ATUAL	88
FIGURA 76 - ZONA DE FIXAÇÃO DA FERRAMENTA FUTURA	90
FIGURA 77 - DETALHES DA FORÇA E ÁREA DE APLICAÇÃO NA FERRAMENTA FUTURA	91
FIGURA 78 - DETALHES DA MALHA <i>CURVATURE-BASED MESH</i> DA FERRAMENTA FUTURA	91
FIGURA 79 - ANÁLISE DE TENSÕES EQUIVALENTES DE VON MISES DA FERRAMENTA FUTURA	92
FIGURA 80 - ANÁLISE DE DESLOCAMENTOS RESULTANTES DA FERRAMENTA FUTURA	92
FIGURA 81 - PLANO DE IMPLEMENTAÇÃO	94
FIGURA 82 - RELATÓRIO DE CONTROLO DE FERRAMENTAL CRÍTICO	95

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - CASOS DE ESTUDO: ABORDAGEM DMAIC	17
TABELA 2 - SIMBOLOGIA FLUXOGRAMA- ADAPTADO(LEANMANUFACTURE, N.D.)	22
TABELA 3 - FERRAMENTAS E TÉCNICAS UTILIZADAS NA METODOLOGIA SIX-SIGMA	33
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DA PRENSA HIDRÁULICA UTILIZADA NO PROCESSO DE PRENSAGEM DE ESTADORES	36
TABELA 5 - TIPO DE FERRAMENTAS	38
TABELA 6 - ESQUEMATIZAÇÃO DE ACOPLAMENTO ENTRE DOIS CASQUILHOS	44
TABELA 7 - PARÂMETROS CONSIDERADOS NO CÁLCULO DE μ	46
TABELA 8 - VALORES UTILIZADOS NO CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO (μ)	47
TABELA 9 - CAUSAS MAIS CRÍTICAS DO COEFICIENTE DE ATRITO ELEVADO	50
TABELA 10 - DIMENSÕES TEÓRICAS DO ESTATOR E CARÇAÇA	62
TABELA 11 - CARACTERÍSTICAS DO SPRAY CONGELANTE	63
TABELA 12 - DIMINUIÇÃO DE COTA - UTILIZANDO SPRAY CONGELANTE	63
TABELA 13 - CARACTERÍSTICAS DOS 3 TIPOS DE PRODUDOS UTILIZADOS NA ANÁLISE DOE	64
TABELA 14 - FATORES E NÍVEIS DA ANÁLISE <i>FULL FACTORIAL</i>	65
TABELA 15 - DADOS UTILIZADOS NO CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO - ANÁLISE DOE	66
TABELA 16 - DADOS VALIDAÇÃO DOE	70
TABELA 17 - PROPOSTAS DE MELHORIA - BLOCOS PARA OLHAIS	72
TABELA 18 - DADOS UTILIZADOS NO CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO - ANÁLISE BLOCO PARA OLHAIS	73
TABELA 19 - CARACTERÍSTICAS DA FERRAMENTA PROTETORA DE RESINA	75
TABELA 20 - PROPOSTA DE MELHORIA - FERRAMENTA PROTETORA DE RESINA	76
TABELA 21 - DADOS UTILIZADOS NO CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO - ANÁLISE FERRAMENTA PROTETORA DE RESINA	77
TABELA 22 - DIMENSÕES CONSIDERADAS NA BASE DE CÁLCULO DA PROPOSTA DE AQUECIMENTO DE CARÇAÇA	79
TABELA 23 - ANÁLISE DE MOTORES DO TIPO 250 INSERIDOS DE MAIO A AGOSTO DE 2021	82
TABELA 24 - CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL DA FERRAMENTA ATUAL - ST-37 (<i>SOLIDWORKS</i> , 2021)	85
TABELA 25 - DADOS COLETADOS - FORÇA DE PRENSAGEM (N)	86
TABELA 26 - ALTERAÇÕES DO DESENHO CAD DA FERRAMENTA FUTURA	88
TABELA 27 - CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL DA FERRAMENTA FUTURA - AISI 1020 (<i>SOLIDWORKS</i> , 2021)	90
TABELA 28 - ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS - ANÁLISE ESTÁTICA	93
TABELA 29 - SOLUÇÕES E MEDIDAS IMPLEMENTADAS CORRESPONDENTES A CADA OBJETIVO DEFINIDO	101

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	3
1.1	Enquadramento.....	3
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Metodologia	4
1.4	Estrutura da dissertação.....	4
1.5	Apresentação da Empresa de Acolhimento	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Motores Elétricos	9
2.1.1	Motores Elétricos de Indução Trifásicos	10
2.1.2	Mercado Global de Motores Elétricos.....	12
2.2	Processos de Montagem de Componentes	14
2.2.1	Ajustamento com Aperto	14
2.2.2	Montagem por Aperto.....	15
2.2.3	Prensa Hidráulica	15
2.3	<i>Six-Sigma</i>	16
2.3.1	DMAIC.....	17
2.3.2	Ferramentas e Técnicas Utilizadas na Filosofia <i>Six-Sigma</i>	19
2.3.2.1	Sete Ferramentas Básicas da Qualidade	20
2.3.2.1.1	Cartas de Controlo.....	21
2.3.2.1.2	Diagrama de Pareto.....	21
2.3.2.1.3	Fluxograma	22
2.3.2.1.4	Diagrama de Ishikawa.....	22
2.3.2.2	<i>Statistical Process Control (SPC)</i>	23
2.3.2.3	Outras ferramentas utilizadas na filosofia <i>Six Sigma</i>	24
2.3.2.3.1	<i>Brainstorming</i>	24
2.3.2.3.2	<i>5 Why's</i>	24
2.3.2.3.3	SIPOC	25
2.3.2.3.4	Mapa de Processo	25
2.3.2.3.5	Mapa de Raciocínio	26
2.3.2.4	Técnicas Estatísticas <i>Six-Sigma</i>	27
2.3.2.4.1	<i>Measurement System Analysis (MSA)</i>	27
2.3.2.4.2	<i>Design of Experiments (DOE)</i>	27
2.4	Análise de Elementos Finitos	28
2.5	Impacto do Calor em Objetos	29

2.5.1	Expansão Térmica.....	29
2.5.2	Transferência de calor por condução transiente	29
3	DESENVOLVIMENTO	33
3.1	Fase <i>Define</i>	34
3.2	Fase <i>Measure</i>	41
3.3	Fase <i>Analyse</i>	42
3.3.1	Determinação da causa raiz do problema.....	43
3.3.2	Cálculo Teórico do Coeficiente de Atrito (μ)	44
3.3.3	Determinação do valor μ experimental	45
3.3.4	Elaboração do Mapa de Processo	48
3.3.5	Identificação das Causas Críticas do Coeficiente de Atrito (μ) Elevado	49
3.3.6	MSA – <i>Measurement System Analysis</i>	50
3.3.6.1	MSA – Diâmetro Interno de Carças	52
3.3.6.2	MSA – Diâmetro Externo de Estatores.....	55
3.3.6.3	MSA – Temperatura de Carças	58
3.4	Fase <i>Improve</i>	61
3.4.1	a) Alteração do produto aplicado.....	62
3.4.1.1	a1) Teste de Spray Congelante.....	62
3.4.1.2	a2) Teste de spray anti atrito - Análise <i>Design of Experiments</i>	63
3.4.2	b) Centralização correta do conjunto Estator + Carça.....	71
3.4.2.1	b1) Teste de caixas de olhais	71
3.4.2.2	b2) Teste de ferramenta protetora de resina	74
3.4.3	c) Aquecimento prévio de carças.....	79
3.4.4	Alteração do Projeto da Ferramenta.....	84
3.4.4.1	Análise Estática da Ferramenta Atual	84
3.4.4.2	Análise Estática da Ferramenta Futura	88
3.4.4.3	Análise Comparativa de Resultados – Análise Estática	92
3.4.4.4	Orçamento de Ferramenta Futura	93
3.4.5	Elaboração de Plano de Implementação.....	93
3.5	Fase <i>Control</i>	94
4	ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS	97
5	CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	101
5.1	Conclusões.....	101
5.2	Proposta de trabalhos futuros	102
6	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	107

7	ANEXOS	115
7.1	Dados Cálculo do Coeficiente de Atrito Experimental - Condições Atuais ...	115
7.2	Amostras Análise MSA	116
7.2.1	Amostras MSA – Diâmetro Interno da Carçaça.....	116
7.2.2	Amostras MSA – Diâmetro Externo do Estator	117
7.2.3	Amostras MSA – Temperatura de Carçaças	118
7.3	Dados Cálculo do Coeficiente de Atrito – Análise DOE.....	119
7.4	Dados Cálculo do Coeficiente de Atrito – Validação da Análise DOE	119
7.5	Dados Cálculo do Coeficiente de Atrito – Validação de Blocos nos Olhais...	119
7.6	Ferramenta Protetora de Resina.....	120
7.7	Dados Cálculo do Coeficiente de Atrito – Validação de Ferramenta Protetora de Resina.....	122
7.8	Desenho da Ferramenta Atual	123
7.9	Desenho da Ferramenta Futura	124
7.10	Mapa de Raciocínio	125

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

1.2 OBJETIVOS

1.3 METODOLOGIA

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

1.5 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA DE ACOLHIMENTO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Atualmente, as indústrias têm vindo a enfrentar períodos desafiantes devido às constantes alterações das necessidades dos clientes, à globalização dos mercados mundiais e à necessidade constante da inovação das suas propostas de valor. Assim, surge a necessidade da melhoria interrupta da qualidade dos seus processos. Por esta razão, cada vez mais empresas têm vindo a recorrer a filosofias de *Problem Solving* com o intuito de reduzir custos e melhorar a qualidade dos seus processos e produtos, como é exemplo a filosofia *Six-Sigma*. A filosofia *Six-Sigma* pode ser interpretada como um método sistemático e organizado orientado para o alcance de processos mais eficientes através da utilização de técnicas estatísticas e ferramentas da qualidade que são suportes essenciais na tomada de decisões (J. P. Costa *et al.*, 2019).

A presente dissertação é relativa ao desenvolvimento de um caso de estudo na indústria de motores elétricos cujo objetivo é o aumento da vida útil de uma ferramenta utilizada no processo de introdução de estatores em carcaças de motores elétricos. Cada ferramenta é utilizada como suporte do estator e é apoiada na base de uma prensa hidráulica. Por conseguinte, verificaram-se desgastes prematuros que levaram ao sucateamento precoce desta ferramenta. Foi aplicada a filosofia *Six-Sigma* de modo a reduzir a necessidade de substituição da ferramenta através do aumento da sua vida útil.

1.2 Objetivos

O principal objetivo do presente caso de estudo é o aumento da vida útil de uma ferramenta utilizada na indústria de motores elétricos. Os objetivos específicos associados ao desenvolvimento do presente caso de estudo são os seguintes:

- Análise e caracterização do processo de introdução de estatores em carcaças de motores elétricos;
- Análise de dados históricos relativos ao dano e sucateamento da ferramenta;
- Identificação da causa raiz da elevada necessidade de substituição de ferramenta;
- Validação dos sistemas de medição utilizados na recolha de dados do presente trabalho;
- Conceção de propostas de solução de aumento da vida útil da ferramenta;

- Implementação de soluções que visem minimizar a substituição da ferramenta;
- Análise custo-benefício das soluções estudadas.

1.3 Metodologia

Os passos iniciais da elaboração do presente caso de estudo compreenderam os seguintes pontos:

- Estudo e percepção do contexto do problema;
- Elaboração da revisão bibliográfica relativa ao problema analisado.

De seguida, foram tomados os seguintes passos no desenvolvimento do caso de estudo:

- Observação e definição de necessidades e objetivos do projeto de resolução de problemas;
- Coleta de informação necessária ao bom entendimento do *background* do problema;
- Identificação de possíveis causas raízes para o problema de elevada necessidade de substituição de ferramentas de prensagem;
- Coleta de possíveis medidas de melhoria do problema;
- Projeto de um plano de experiências;
- Simulação de propostas de melhorias;
- Validação de resultados e análise custo/benefício das soluções propostas;

Posteriormente foram apresentadas conclusões finais sobre o caso de estudo e propostos trabalhos futuros.

Finalmente, a metodologia da elaboração deste caso de estudo terminou com a redação da presente dissertação.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em quatro partes: uma parte inicial de Revisão Bibliográfica, uma segunda parte de Desenvolvimento, uma terceira parte de Análise de Resultados e uma última parte de Conclusões. A revisão bibliográfica é composta por informações técnicas e científicas organizadas de maneira estruturada e encadeada que são essenciais para um bom entendimento do caso de estudo. O desenvolvimento é constituído pela descrição do problema do caso de estudo, conceção de e análise propostas de solução. A quarta parte é composta por uma análise crítica dos resultados obtidos no desenvolvimento. A última parte da dissertação é composta pelas conclusões do caso de estudo e pelas propostas de trabalhos futuros.

1.5 Apresentação da Empresa de Acolhimento

O Grupo WEG S.A., inicialmente dedicado à produção de motores elétricos, foi fundado em 1961 no Estado de Santa Catarina, Brasil por Werner Voigt, Eggon da Silva e Geraldo Werninghaus.

Inicialmente, o grupo empresarial começou com a produção de motores elétricos e nos anos 80 expandiu as suas atividades de negócio para a produção de componentes elétricos e eletrónicos, tecnologias de automação industrial, transformadores de potência e de distribuição, revestimentos líquidos e em pó e vernizes isolantes. Recentemente, o grupo empresarial expandiu a sua área de negócio ao entrar nos setores de energia eólica e solar e no setor de mobilidade elétrica, passando a ser fornecedor de sistemas industriais completos.

Atualmente, a WEG S.A. conta com mais de 33 300 colaboradores e as fábricas do grupo estão distribuídas por 12 países tal como é visível na figura 1.

WEG S.A. - UNIDADES INDUSTRIAIS EM 12 PAÍSES



Figura 1 - Unidades Industriais WEG S.A – Adaptado (WEG, 2021b)

Em Portugal, existem duas unidades fabris pertencentes ao grupo empresarial: uma localizada no concelho da Maia e outra localizada no concelho de Santo Tirso.

A unidade do concelho da Maia, com $18\,150\ m^2$, conta com 288 colaboradores e destina-se à produção de motores de média tensão e alta tensão. O seu volume médio de produção semanal é de 10 motores/semana.

A unidade do concelho de Santo Tirso, com $43\,364\ m^2$, conta com 219 colaboradores e destina-se à produção de motores de baixa tensão. O seu volume médio de produção semanal é de 225 motores/semana.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MOTORES ELÉTRICOS

2.2 PROCESSOS DE MONTAGEM DE COMPONENTES

2.3 *SIX-SIGMA*

2.4 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

2.5 IMPACTO DO CALOR EM OBJETOS

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo expõe uma revisão bibliográfica da literatura sobre os temas que suportam este caso de estudo. É composto por cinco subcapítulos. O primeiro subcapítulo é composto por uma introdução à temática de motores elétricos. O segundo subcapítulo é composto por uma introdução à temática de motores elétricos. O segundo subcapítulo incorpora matéria de processos de montagem de componentes. No terceiro subcapítulo abordam-se conceitos *Six-Sigma* e descrevem-se respetivas técnicas e ferramentas. O quarto subcapítulo é relativo à descrição da análise de elementos finitos. O último e quinto subcapítulo é composto por conceitos relacionados com o impacto do calor em objetos.

2.1 Motores Elétricos

Os motores elétricos, equipamentos eletromecânicos responsáveis pela conversão de energia elétrica em energia mecânica, são frequentemente utilizados em várias aplicações industriais e revelam-se elementos essenciais no asseguramento da continuidade do processo de desenvolvimento e da cadeia de produção de muitas indústrias(Weili *et al.*, 2007).

De acordo com o tipo de alimentação, existem dois tipos de motores elétricos: motores de corrente contínua (DC) e motores de corrente alternada (AC). De acordo com o princípio de funcionamento, os motores DC podem dividir-se em motores *Brush* e motores *Brushless*, e os motores AC podem dividir-se em motores de indução e motores síncronos.

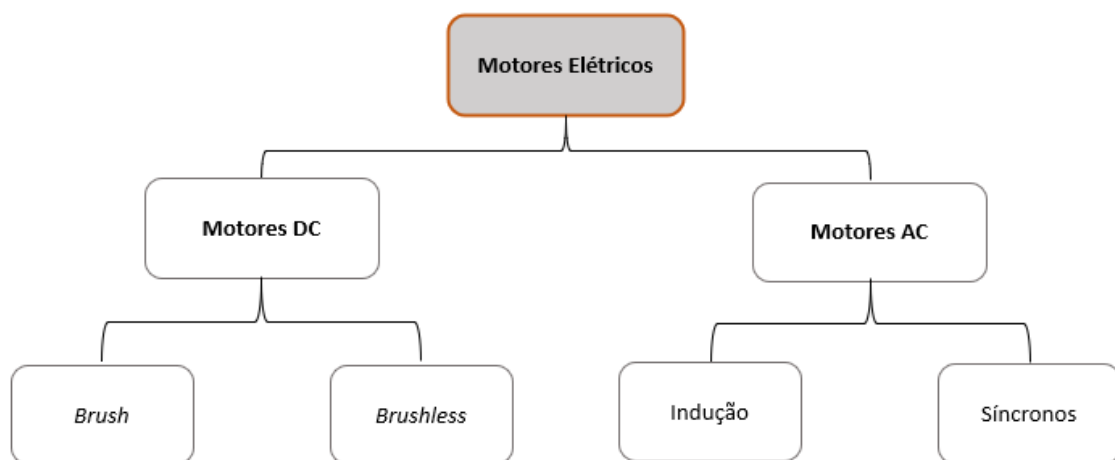


Figura 2 - Tipos de motores elétricos

Os motores AC e DC podem ser complementados com sistemas de sensores e *hardware* estrategicamente integrados para implementação de manutenção preditiva e otimização do tempo despendido em tarefas de manutenção (Vivek *et al.*, 2019).

Os motores elétricos desempenham um papel importante nas suas aplicações no setor industrial e automóvel (Dr. Hollstein, n.d.). São também comumente utilizados em refinarias e explorações mineiras. Estes setores exigem que estes motores apresentem uma performance fiável e eficiente (Glowacz, 2018).

O presente caso de estudo contempla o processo produtivo de motores AC de indução trifásicos que irão ser caracterizados de seguida.

2.1.1 Motores Elétricos de Indução Trifásicos

O motor de indução trifásico é um motor altamente utilizado devido à sua robustez, preço acessível, baixa necessidade de manutenção e alta adaptabilidade a vários tipos de ambientes, incluindo ambientes explosivos e severos (Sales, 2016).

Este motor elétrico apresenta algumas vantagens em relação aos restantes motores DC e motores AC Síncronos, nomeadamente (Chapman, 2012; Rashid, 2014):

- Possibilidade de ser ligado à rede de distribuição trifásica de energia elétrica;
- Construção simples;
- Elevada robustez;
- Boa tolerância a ambientes hostis e a vibrações fortes, não existindo formação de faíscas devido a contactos deslizantes na parte do rotor;
- Facilidade de integração em sistemas mecânicos de transmissão;
- Possibilidade de produção em gamas alargadas de potência.

Existem dois tipos de motores AC de Indução: motores de rotor em gaiola e motores de rotor enrolado.

De forma resumida, o motor de indução com rotor em gaiola é constituído pelos seguintes componentes (Chapman, 2012):

- Carcaça: estrutura geralmente em ferro fundido que tem como função suportar partes do motor (tampas, caixa de ligação, estator, entre outras). Geralmente é composta por aletas e nervuras responsáveis pela otimização da dissipação de calor do motor;
- Núcleo estatórico: constituído por um conjunto de chapas ferromagnéticas isoladas e empilhadas entre si. É constituído por enrolamentos trifásicos, simétricos e com um desfasamento entre si de 120° (KOSOW, 1993).
- Rotor: constituído por chapas ferromagnéticas. Neste tipo de rotor a gaiola é constituída por barras e anéis. As barras, os anéis e o núcleo do rotor formam uma peça única. Os anéis fabricados, geralmente em alumínio, funcionam como condutores e como ventiladores de arrefecimento.

Na figura 3 apresentam-se os constituintes de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola:

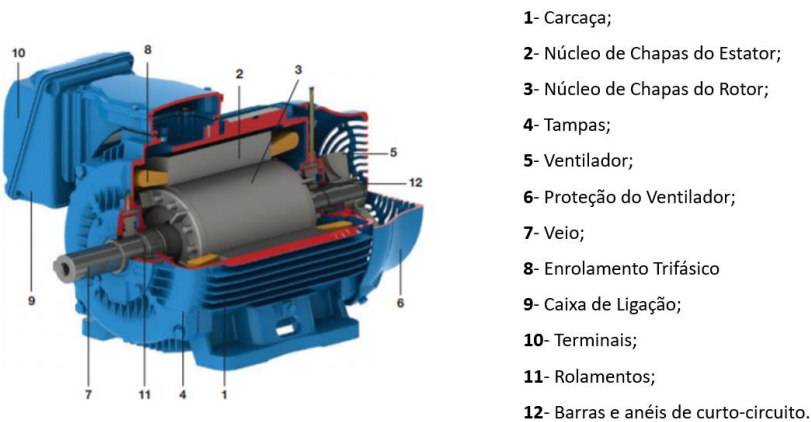


Figura 3 - Constituintes de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola- Adaptado (WEG, 2021a)

Funcionamento do Motor de Indução Trifásico com Rotor em Gaiola

O estator do motor de indução trifásico com rotor em gaiola é constituído por três enrolamentos, simétricos, desfasados 120° entre si. Assim que os enrolamentos sejam percorridos pela corrente trifásica da rede de distribuição, um campo magnético girante é criado.

Quando o rotor é atravessado pelo campo magnético girante ocorre uma variação de fluxo nos condutores da gaiola, gerando-se, de acordo com a lei de Faraday, uma força eletromotriz (f.e.m.) nesses condutores do rotor. Os condutores do rotor são percorridos por correntes induzidas, que tendem a ter um sentido oposto à causa que lhes deu origem (lei de Lenz). Desta maneira, é criado um campo magnético no rotor contrário ao campo magnético girante do estator e com polaridade contrária.

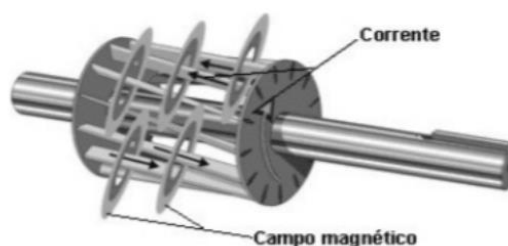


Figura 4 - Campo Magnético e Corrente no Rotor – Adaptado (Francisco, 2006)

Tendo em consideração que o campo do estator é girante e que polos opostos tendem a atrair-se, verifica-se o movimento do rotor. São criadas forças eletromagnéticas entre as correntes do rotor e o campo magnético girante do estator responsáveis pela rotação do rotor (K. C. Agrawal, 2001b, 2001a).

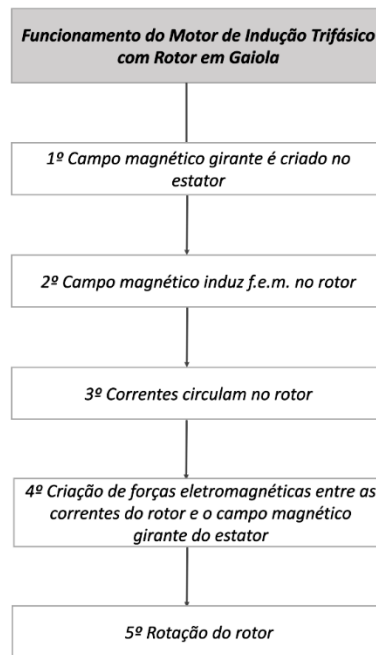


Figura 5 - Funcionamento do Motor de Indução Trifásico com Rotor em Gaiola

Lei de Faraday: a f.e.m que é induzida numa espira de um condutor metálico é em módulo equivalente à taxa de variação temporal do fluxo magnético que atravessa essa mesma espira.

Lei de Lenz: O sentido da f.e.m. induzida é tal que tende a opor-se à variação que a provocou.

2.1.2 Mercado Global de Motores Elétricos

O número de motores elétricos produzidos tem aumentado a cada ano (Glowacz, 2018).

Em 2017 o valor de mercado de motores elétricos atingiu o valor de \$96 967,9 milhões de dólares e é expectável que em 2025 este valor atinja \$136 496,1 milhões de dólares (Vivek *et al.*, 2019).

O mercado dos motores elétricos tem áreas de aplicação específicas e o seu crescimento depende diretamente do crescimento das indústrias que usufruem deste tipo de motores. Porém, é também necessário ter em consideração o papel da mudança do processo de fabrico dos motores elétricos: atualmente, devido à automatização dos processos industriais e ao *upgrade* das tecnologias utilizadas na sua produção, é possível encontrar motores elétricos no mercado altamente eficientes a um preço acessível o que impulsiona o crescimento do mercado global destes motores.

O mercado global de motores elétricos é segmentado, entre outros, por tipo de motor, área de aplicação e região (Vivek *et al.*, 2019).

Considerando o segmento de tipo do motor, o mercado global pode dividir-se em três tipos: motores AC, DC e motores herméticos¹.

De acordo com a figura 6, em 2017 a fração de motores AC obteve a maior *share* de mercado devido ao incremento na procura pela automatização de sistemas de transporte no setor industrial (Vivek *et al.*, 2019).

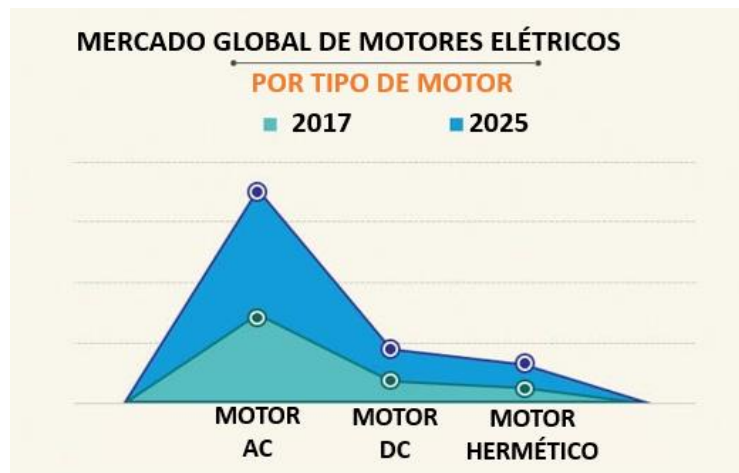


Figura 6 - Análise de Mercado Global de Motores Elétricos - Por tipo de Motor- Adaptado (Vivek *et al.*, 2019)

Considerando o segmento de área de aplicação, o mercado global pode dividir-se em seis tipos: equipamentos industriais, veículos motorizados, equipamentos HVAC, área aeroespacial e transportes, eletrodomésticos e outras aplicações comerciais.

Tal como é possível verificar na figura 7, em 2017 a fração de equipamentos industriais obteve a maior *share* de mercado devido ao aumento da procura de sistemas compressores nos setores industrial e automóvel. Pode também verificar-se o expectável crescimento significativo da *share* de mercado relativa a veículos motorizados (Vivek *et al.*, 2019).

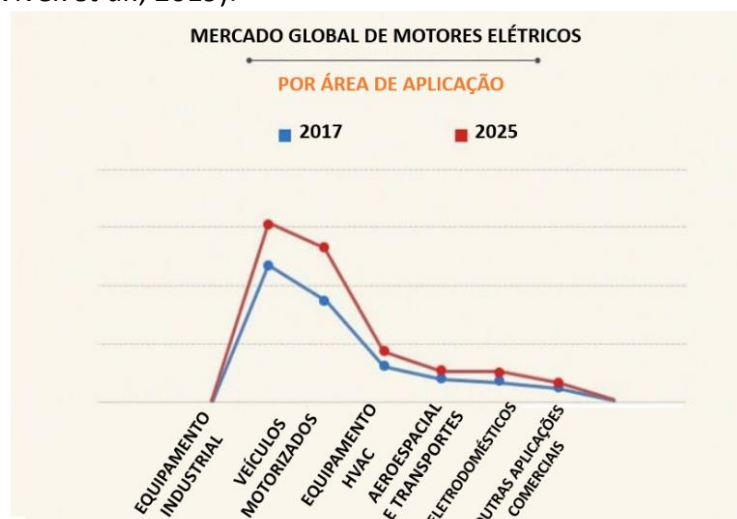


Figura 7 - Análise de Mercado Global de Motores Elétricos - Por Área de Aplicação- Adaptado (Vivek *et al.*, 2019)

¹ Equipamento cujos motor elétrico e compressor se encontram dentro da carcaça do equipamento.

Após a análise do segmento de região, verificou-se que em 2017 a região da América do Norte apresentou o maior valor de *share* de mercado (em termos de receita) – 34,3% - seguida pela região Ásia-Pacífico (Vivek *et al.*, 2019).

2.2 Processos de Montagem de Componentes

A montagem dos vários componentes de um motor elétrico inclui vários processos industriais e a utilização de diversos equipamentos industriais. Um dos processos que pode ser adotado para a montagem do estator na carcaça de um motor elétrico é a montagem por aperto com recurso a uma prensa hidráulica.

2.2.1 Ajustamento com Aperto

Um ajustamento mecânico traduz-se na ligação de um veio com um furo de uma determinada peça. A dimensão interior de um furo e a dimensão exterior de um veio, que vão ser acoplados, apresentam a mesma dimensão nominal. A estas dimensões nominais são adicionadas tolerâncias em conformidade com o ajustamento pretendido (Morais, 2015).

Um ajustamento com aperto é caracterizado pela dimensão real do furo ser, sempre, menor que a dimensão real do veio. Deste modo, o aperto corresponde ao valor absoluto da diferença entre a dimensão real do furo e a dimensão real do veio. O aperto máximo corresponde ao mais difícil acoplamento entre os dois elementos (Morais, 2015).

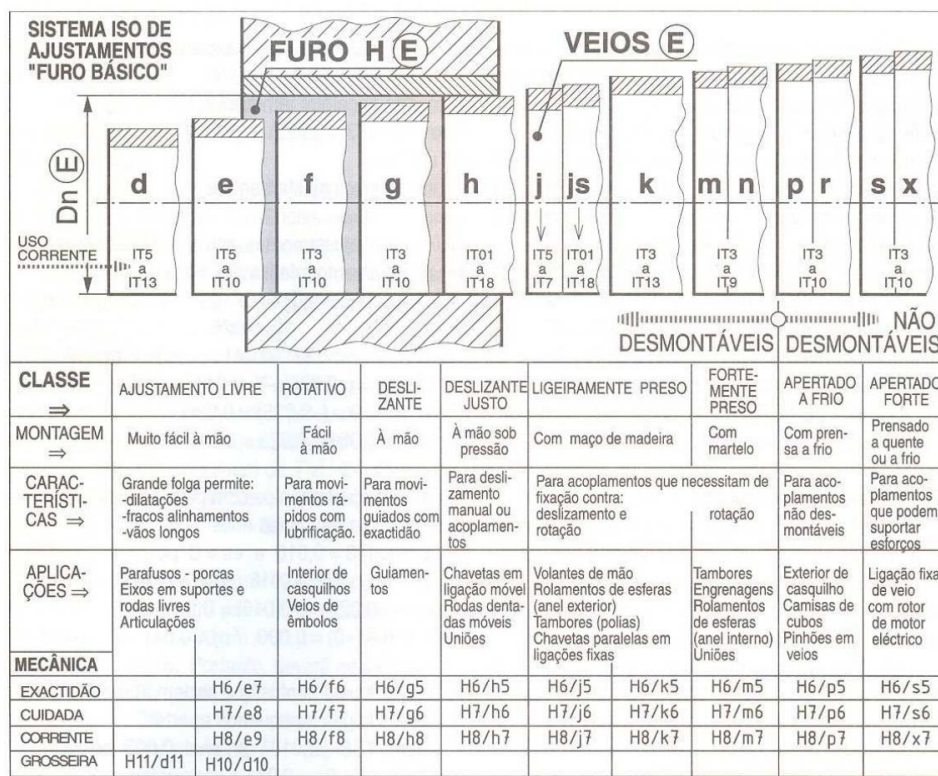


Figura 8 - Exemplos de ajustamentos "Furo Básico" (Morais, 2015)

No sistema de ajustamentos furo básico, o furo apresenta uma tolerância na posição H. Com um furo H é possível ajustarem-se veios com aperto em que as tolerâncias têm posições que vão de p a zc, sendo o aperto tanto maior quanto mais afastada de h estiver a letra da posição. A figura 8 apresenta uma representação do sistema ISO de ajustamentos – Furo Básico complementada com alguns exemplos de acoplamentos (Morais, 2015).

2.2.2 Montagem por Aperto

Uma montagem por aperto resulta no encaixe de duas peças, cuja fixação é conseguida devido ao atrito criado durante a montagem dessas peças (Nduka *et al.*, 2017).

No caso da montagem por aperto do estator na carcaça de um motor elétrico, a dimensão real do diâmetro interno da carcaça é menor que a dimensão real do diâmetro externo do estator, existindo, portanto, uma ligação de aperto entre os dois componentes.

Cabe à equipa de engenharia de uma organização determinar qual o valor do aperto a ser estabelecido entre os dois componentes, tendo em consideração o momento máximo alcançado pelo motor, características do material e *design* das duas peças, procurando evitar situações de esmagamento e dano durante o processo de montagem do estator na carcaça de um motor elétrico (KOLLMORGEN, n.d.).

2.2.3 Prensa Hidráulica

Em qualquer chão de fábrica, uma prensa hidráulica revela-se um equipamento industrial essencial no auxílio de montagens por aperto, uma vez que permite a produção de uma força compressiva por meio de um fluído (Okolie *et al.*, 2020).

Os principais componentes deste equipamento são a estrutura, o cilindro hidráulico e o prato da prensa. O funcionamento da prensa hidráulica segue o princípio de Pascal, que dita que a pressão aplicada a um fluído fechado num determinado recipiente transmite-se de maneira uniforme em todas as direções (InfoPedia, 2021). O sistema hidráulico do equipamento é composto por dois cilindros: um cilindro com um diâmetro maior e outro cilindro com um diâmetro menor.

O princípio de funcionamento da prensa hidráulica pode ser retratado da seguinte forma: o fluído presente no sistema hidráulico (geralmente óleo) é vertido no cilindro de menor diâmetro. O pistão presente no cilindro de menor diâmetro é empurrado com uma determinada força, comprimindo o fluído no seu interior que, por sua vez, será deslocado até ao cilindro de diâmetro superior. Sendo a pressão transmitida uniformemente, pode verificar-se que uma força menor aplicada no fluído pelo cilindro menor resulta numa maior força quando empurrada no cilindro maior (Khatib *et al.*, 2020).

No caso da montagem de um estator numa carcaça de um motor elétrico é esta força que é responsável pela introdução da carcaça em volta do estator.

2.3 Six-Sigma

O surgimento de processos e operações industriais cada vez mais complexos exige uma implementação eficaz de metodologias de *problem solving* (Abele *et al.*, 2018). O presente caso de estudo aborda a implementação da filosofia *Six-Sigma* na resolução de um problema identificado na Indústria Elétrica.

A filosofia *Six-Sigma* surgiu na sede do grupo Motorola, no final da década de 1980, com a necessidade de aumentar a competitividade e eficácia relativamente aos seus concorrentes, conseguindo, portanto, a redução da quantidade de defeitos acompanhada pela redução de custos e aumento de produtividade (Harry & Schroeder, 2005; Henderson & Evans, 2000; Pande *et al.*, 2007). Perante a existência de resultados tão satisfatórios, outras empresas adotaram esta filosofia, conseguindo obter poupanças económicas significativas (Antony & Banuelas, 2002).

A filosofia *Six-Sigma* pode ser caracterizada de acordo com duas perspetivas: uma perspetiva estatística e uma perspetiva económica (Kwak & Anbari, 2006).

Na estatística, a letra σ (sigma) é utilizada para representar o desvio padrão de uma amostra de dados. Na filosofia *Six-Sigma*, o termo sigma simboliza a variabilidade de um determinado processo industrial ou de uma amostra de produtos em relação a um valor nominal (Henderson & Evans, 2000; Montgomery, 2020). Deste modo, a filosofia *Six-Sigma* é aplicada com a finalidade de redução da variabilidade de processos industriais, para que exista a redução da quantidade de defeitos para valores próximos de 6σ . Assim, ao analisar-se um processo que segue uma distribuição normal centrado no valor nominal, 6σ representa a longo prazo 3.4 defeitos por milhão de amostras analisadas, com uma percentagem de qualidade de 99,99966% (Breyfogle, 2003; Montgomery, 2020).

De uma perspetiva económica, o *Six-Sigma* é caracterizado como sendo uma filosofia que pode ser implementada por organizações que anseiem incrementar a rentabilidade do seu negócio, focando-se no aumento da eficácia e eficiência das suas operações e na melhoria dos seus indicadores de *performance* (Antony & Coronado, 2001; Cagnazzo *et al.*, 2010).

A fim de melhorar os seus processos, produtos e serviços as organizações devem escolher qual a abordagem a ser adotada na filosofia *Six-Sigma*. O DMAIC é uma abordagem que permite a operacionalização da filosofia *Six-Sigma*.

2.3.1 DMAIC

DMAIC, acrónimo de *Define* (Definir), *Measure* (Medir), *Analyse* (Analisar), *Improve* (Melhorar) e *Control* (Controlar) é uma metodologia da filosofia *Six-Sigma*, considerada um ciclo de desenvolvimento de projetos de melhoria, e é estruturada da seguinte forma (T. Costa et al., 2017b; Maia et al., 2019):

- **Define**- definição do problema e de todos os aspetos relevantes para o bom entendimento do caso de estudo;
- **Measure**- medição da situação atual do problema. Informação é coletada e interpretada de forma mensurável;
- **Analyse**- identificação das possíveis causas raiz do problema. Assim que a causa raiz do problema esteja identificada, a fase *Improve* pode iniciar-se;
- **Improve**- conceção de propostas de solução. Avaliação e implementação de soluções;
- **Control**- controlo do processo analisado e validação de resultados.

Na tabela 1 são apresentadas algumas conclusões de alguns casos de estudo que abordam a implementação da abordagem do DMAIC.

Tabela 1 - Casos de Estudo: Abordagem DMAIC

Autor/Ano	Setor	Título	Análise
(Dambhare et al., 2013)	Indústria de Motores a Diesel	<i>Productivity Improvement of a Special Purpose Machine Using DMAIC Principles: A Case Study</i>	No caso de estudo, a abordagem do DMAIC foi implementada para o seguinte objetivo: redução de taxa de retrabalho de furação em peça de motor- <i>target value</i> = 0%. A taxa de retrabalho reduziu de 16% para 2,20%.
(Prashar, 2014)	Indústria Aeronáutica	<i>Adoption of Six Sigma DMAIC to reduce cost of poor quality</i>	No caso de estudo, uma empresa produtora de componentes de helicópteros implementou a abordagem do DMAIC na sua divisão de reparação. A taxa de rejeição da linha de montagem de ventiladores de refrigeração reduziu de 9% para 0%.
(Kaushik et al., 2012)	Indústria de Componentes de Bicicletas	<i>A case study: Application of Six Sigma methodology</i>	No caso de estudo implementado numa PME, aplicou-se a abordagem do DMAIC com o objetivo da redução da taxa de rejeição de um

		<i>in a small and medium-sized manufacturing enterprise</i>	componente. Como resultado, houve a redução de 80 213,05 PPM, o aumento do valor de σ de 1,40 para 5,46 e uma poupança anual de € 5 859.
(Ev et al., 2011)	Indústria Automóvel	<i>Application of Six Sigma Methodology to Reduce Defects of a Grinding Process</i>	No caso de estudo, aplicou-se uma abordagem do DMAIC com a finalidade da redução de variabilidade de um processo de lixamento fino. Verificou-se a redução da taxa de defeitos de 16,6% para 1,19%. A abordagem do DMAIC apresentou um impacto significativo na redução do custo da não-qualidade, da necessidade de mão de obra e de retrabalho. Verificou-se uma poupança anual de \$ 4 milhões de dólares.
(T. Costa et al., 2017a)	Indústria Automóvel – Produção Pneus	<i>Improve the extrusion process in tire production using Six Sigma methodology</i>	O caso de estudo inclui a aplicação da abordagem do DMAIC a fim da resolução do problema de elevada quantidade de material não conforme no processo de extrusão – responsável por influenciar diretamente o indicador de desempenho <i>work-off</i> . Verificou-se a redução de 0,89% do indicador de <i>work-off</i> e a poupança anual de €165 000.
(Pereira et al., 2019)	Indústria de Moldes	<i>Lean Six Sigma Approach to Improve the Production Process in the Mould Industry: a Case Study</i>	No caso de estudo, a abordagem do DMAIC foi aplicada com a finalidade da otimização do processo interno de produção de moldes. O diagrama de pareto foi utilizado para a análise dos eventos responsáveis por paragens. A abordagem do DMAIC apresentou um impacto significativo no aumento de 20% do OEE.

(Guleria <i>et al.</i> , 2021)	Indústria Automóvel	<i>Lean six-sigma implementation in an automobile axle manufacturing industry: A case study</i>	No caso de estudo, a abordagem do DMAIC foi implementada de modo a eliminar variações do processo produtivo de eixos para automóveis. A abordagem DMAIC compreendeu a elaboração e análise de SIPOC, diagrama de pareto, cartas de controlo e diagrama de Ishikawa. A taxa de rejeição reduziu de 10,4% para 3,20%. O valor de σ associado ao processo apresentou uma melhoria de 3,34 para 3,94.
--------------------------------	----------------------------	---	--

2.3.2 Ferramentas e Técnicas Utilizadas na Filosofia Six-Sigma

Uma das características da filosofia *Six-Sigma* é a implementação de ações fundamentadas e justificadas por uma prévia análise de dados. Para se poder assegurar a análise acurada de dados e a transformação desses dados em informação viável e processável, recorre-se a ferramentas e a técnicas (Hahn *et al.*, 2001).

Uma ferramenta pode ser descrita como um mecanismo com uma função clara e com uma aplicação bem definida. Uma técnica, por outro lado, tem um campo de aplicação mais vasto que a ferramenta - são necessários um maior engenho e um maior conhecimento para se utilizar uma técnica corretamente. Assim, uma técnica pode ser interpretada como uma aplicação conhecedora e perita de diversas ferramentas (Basu, 2009).

Em 2019, Ferreira *et al.* utilizando a metodologia *iLeanDMAIC* obteve resultados satisfatórios na redução de tempo de troca de ferramenta num processo da indústria de madeira (3 min para 17 min). A figura 9 apresenta as várias ferramentas utilizadas durante cada fase DMAIC:



Figura 9 - Ferramentas utilizadas na metodologia *iLeanDMAIC* (Ferreira *et al.*, 2019)

Sá (2020) propôs um modelo para integração de ferramentas *Lean Six Sigma* e requisitos da ISO 9001:2015 capaz de tornar sistemas de gestão de qualidade mais práticos e dinâmicos, reforçando a criação de valor para as organizações. A integração das ferramentas apresentou alguns benefícios, de como são exemplo a melhoria da resolução de problemas, redução de desperdício, melhoria da comunicação interna e aumento de produtividade. A figura 10 apresenta a interface proposta pelo modelo.

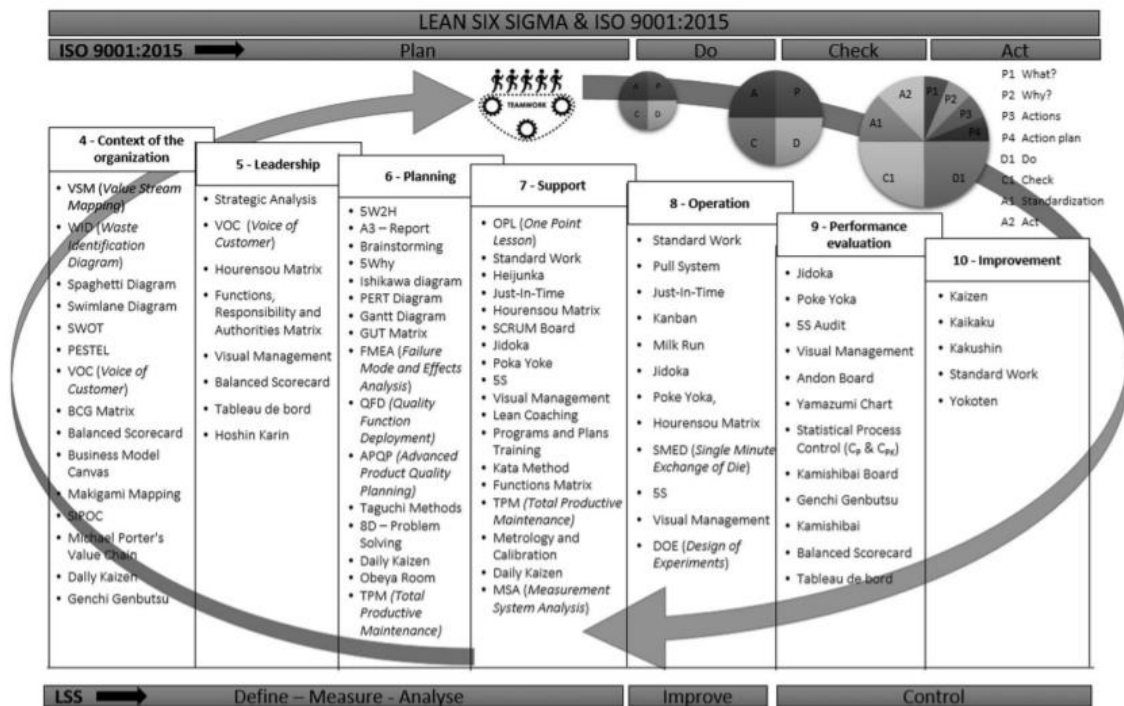


Figura 10- Interface entre ISO9001:2015 e ferramentas e metodologias *Lean Six Sigma* (Sá et al., 2020)

2.3.2.1 Sete Ferramentas Básicas da Qualidade

Ferramentas da qualidade caracterizam-se como utensílios numéricos e gráficos que são utilizados para auxiliar usuários e equipas de trabalho a compreender e melhorar processos.

Ishikawa propôs sete ferramentas básicas para resolver problemas e melhorar processos. Estas sete ferramentas são denominadas de ferramentas básicas da qualidade (Chandrasekaran et al., 2019):

- Cartas de Controlo;
- Histograma;
- Diagrama de Pareto;
- Diagrama de Dispersão;
- Fluxograma;
- Diagrama de Ishikawa;
- Folha de Verificação.

No presente caso de estudo foram aplicadas quatro das sete ferramentas básicas da qualidade que serão caracterizadas de seguida: Carta de Controlo, Diagrama de Pareto, Fluxograma e Digrama de Ishikawa .

2.3.2.1.1 Cartas de Controlo

As cartas de controlo são uma ferramenta estatística cujo principal objetivo reside na monitorização, e controlo da melhoria de processos industriais através do estudo estatístico da variação do processo (Barbosa *et al.*, 2017). Adicionalmente, esta ferramenta permite a exibição e identificação de causas especiais, sendo, portanto, um auxiliar na tomada de decisões de gestão para a obtenção de um processo industrial com melhor performance e maior qualidade (Shah *et al.*, 2010).

A carta de controlo é composta pelos seguintes elementos:

1. Parâmetro a ser exibido no eixo X (horizontal);
2. Parâmetro a ser exibido no eixo Y (vertical);
3. Linha Central, que representa o valor *target* ou a média de um conjunto de valores históricos de uma variável de um determinado processo;
4. Linhas de Controlo que indicam os limites aonde praticamente todos os dados observados devem estar inseridos para que o processo esteja sob controlo estatístico. Existem duas linhas de controlo: linha de controlo superior (LCS) e linha de controlo inferior (LCI). Os pontos que se situam fora destes limites são considerados causas especiais. Por norma, as linhas de controlo são exibidas a 3 desvios-padrão acima e abaixo da linha central.

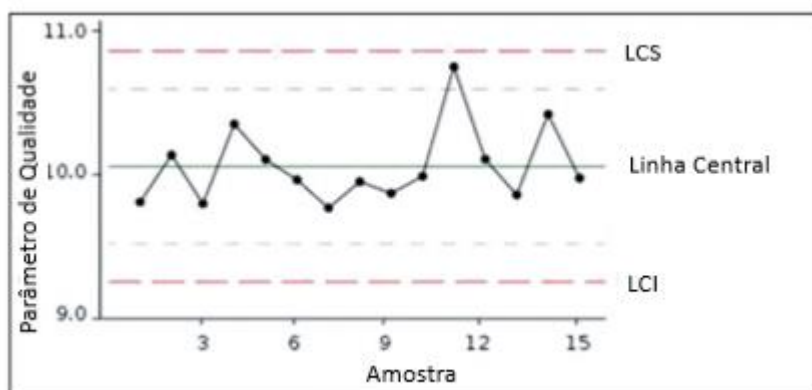


Figura 11 - Carta de Controlo – Adaptado (Shah *et al.*, 2010)

2.3.2.1.2 Diagrama de Pareto

O diagrama de pareto é uma ferramenta com uma utilidade significativa na priorização de ações de alteração de processos industriais. Nesta ferramenta, são utilizados histogramas para ordenar frequências de uma determinada ocorrência, da mais alta para a mais baixa (Karuppusami & Gandhinathan, 2006).

O diagrama de pareto permite identificar os fatores que contribuem mais significativamente para problemas de qualidade (Carpenter, 2010). O diagrama de pareto é baseado no princípio de pareto que afirma que para muitos fenómenos, 80% das consequências são originadas por 20% das causas (Bloch, 2017).

O diagrama de pareto é aplicado em várias áreas da indústria, incluindo a indústria elétrica.




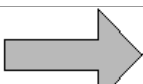
2.3.2.1.3 Fluxograma

O fluxograma é uma ferramenta de gestão da qualidade que permite a representação de atividades e tarefas envolvidas num determinado processo (Cato & Mobley, 2002).

O fluxograma permite ao utilizador representar processos industriais complexos de uma maneira clara. A representação desta ferramenta facilita a identificação de pontos críticos do processo e permite definir os limites do mesmo (Behr *et al.*, 2008).

Esta ferramenta apoia o utilizador na hora da tomada de decisões devido à fácil interpretação das atividades. A lógica utilizada na construção do diagrama de fluxo permite a adaptação a várias operações industriais (Kent, 2016). Assim, é possível obter uma representação de processos utilizando a devida simbologia:

Tabela 2 - Simbologia Fluxograma- Adaptado(Leanmanufacture, n.d.)

Simbologia de Fluxograma	
	Processo
	Zona de Armazém
	Decisão
	Sentido de Fluxo

2.3.2.1.4 Diagrama de Ishikawa

O diagrama de *Ishikawa* ou diagrama de espinha de peixe foi criado por Kaoru Ishikawa. Este diagrama apresenta uma abordagem estruturada para identificação de causas de um problema. Desta forma, durante uma sessão de *brainstorming* são identificadas possíveis causas de um problema e organizadas em diversas categorias (Ahmed & Ahmad, 2011).

Na sua estrutura, o diagrama apresenta a “espinha” central que está diretamente ligada ao efeito/problema a ser analisado. A “espinha” central está diretamente ligada às

categorias principais das possíveis causas do efeito/problema analisado. Das causas principais saem sob a forma de ramificações sub-causas associadas (Salvador & Goldfarb, n.d.).

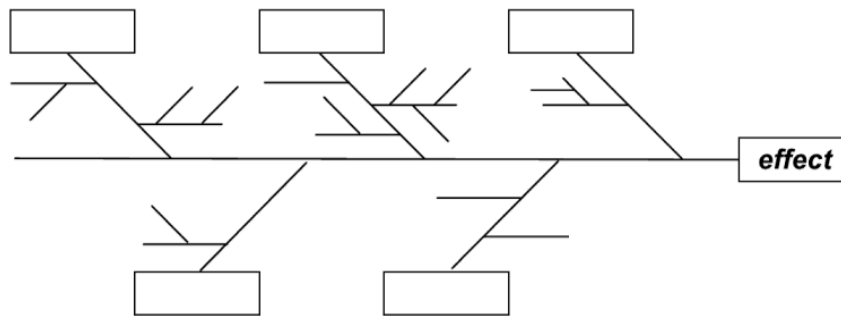


Figura 12 - Diagrama Ishikawa (Meinrath & Schneider, 2007)

2.3.2.2 Statistical Process Control (SPC)

De acordo com Montgomery (2020), o controlo e a melhoria da qualidade dos processos tornaram-se uma estratégia de negócios para as organizações. Deste modo, o controlo estatístico de processos (SPC) pode ser definido como uma metodologia aplicada com o objetivo da identificação e redução das variabilidades existentes nos processos e com impacto na melhoria da qualidade de um produto que esteja a ser produzido (Louzada *et al.*, 2000). As cartas de controlo e os índices de capacidade são as principais ferramentas do SPC (Montgomery *et al.*, 2004).

As cartas de controlo, previamente descritas na **secção 2.3.2.1.1**, são essencialmente utilizadas para distinguir causas comuns de causas especiais, sendo um auxiliar na monitorização e controlo de processos (Montgomery, 2020). Contudo, é importante referir que mesmo um processo sob controlo estatístico pode produzir produtos defeituosos. Desta forma, não é suficiente manter um processo sob controlo, é também necessário avaliar se um processo é capaz de corresponder às necessidades dos clientes (González & Werner, 2009). Para tal, recorre-se aos índices de capacidade.

Os índices de capacidade são valores adimensionais que são utilizados na avaliação da capacidade dos processos conseguirem, ou não, atender às necessidades dos clientes.

Segundo Montgomery (2020) os principais índices de capacidade são o C_p e o C_{pk} .

- C_p : é utilizado para medir o potencial do processo atender às especificações do cliente (González & Werner, 2009). É calculado através da equação 1:

$$C_p = \frac{LCS - LCI}{6\sigma} \quad (1)$$

Aonde:

LCS: limite de controlo superior;

LCI: limite de controlo inferior;

σ : desvio- padrão do processo.

De acordo com Ramos (2012), é possível retirar algumas conclusões relativas ao valor de C_p :

- $C_p < 1$: capacidade do processo não é adequada;
- $1 < C_p < 1,33$: a capacidade do processo está parcialmente adequada. É necessário um controlo mais restrito;
- $C_p > 1,33$: A capacidade do processo está adequada.
- C_{pk} : diferencia-se do C_p por ter em consideração a distância média do processo relativamente aos limites LCS e LCI. É calculado através da equação 2:

$$C_{pk} = \min \left(\frac{LCS - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LCI}{3\mu} \right) \quad (2)$$

Aonde:

μ = média do processo.

2.3.2.3 Outras ferramentas utilizadas na filosofia Six Sigma

Para além das ferramentas básicas da qualidade supramencionadas, a filosofia *Six-Sigma* apoia-se noutras ferramentas de como são exemplo: *brainstorming*, *5Why's*, SIPOC, mapa de processo e mapa de raciocínio.

2.3.2.3.1 Brainstorming

Brainstorming é uma das ferramentas de dinâmica de equipas mais utilizadas mundialmente. É uma ferramenta simples que pode ser aplicada a qualquer situação (Behr *et al.*, 2008).

A ideia base desta ferramenta é a estimulação de ideias geradas de forma fluída e sem restrições. Esta ferramenta encoraja os membros da equipa a serem imaginativos e a pensarem *out of the box*. O *brainstorming* é particularmente útil durante a identificação de problemas e a formulação de propostas de solução. Esta ferramenta é relativamente fácil de utilizar e não consome muito tempo. A ferramenta é realizada seguindo a seguinte sequência (Behr *et al.*, 2008; Rodrigues *et al.*, 2020):

1. Introdução: momento em que se apresenta o tópico a ser abordado;
2. Criação de ideias: etapa de estimulação de ideias, sem restrições;
3. Revisão: etapa aonde se listam as ideias reunidas;
4. Seleção: momento de hierarquização de ideias e rejeição de ideias que não sejam adequadas;
5. Ordenação: Priorização das ideias resultantes da fase de seleção.

2.3.2.3.2 5 Why's

A ferramenta dos 5 *Why's* ajuda os seus utilizadores a chegar à causa raiz de um determinado problema de engenharia. Esta ferramenta ganhou popularidade durante

os anos 70. A estratégia da 5 *Why's* passa por analisar um problema e perguntar as seguintes questões: “Porquê?” e “O que causou este problema?”. Depois de fazer repetidamente estas perguntas é possível apontar repetidamente as causas de um problema até se chegar à causa-raiz (Wang, 2008). Apesar da ferramenta se chamar de 5 *Why's* (5 Porquês) não quer dizer que para chegar à causa-raiz do problema em análise se tenha de fazer esta pergunta mais ou menos que 5 vezes. Esta ferramenta apresenta os seguintes benefícios:

- Ajuda rápida na identificação da causa-raiz de um problema;
- Determinação da relação entre diferentes possíveis causas-raiz de um problema;
- Técnica simples e fácil de aplicar.

2.3.2.3.3 SIPOC

SIPOC, acrónimo de *Supplier* (fornecedor), *Input* (entrada), *Process* (processo), *Output* (saída) e *Customer* (cliente) é uma ferramenta utilizada em metodologias de resolução de problemas, que permite a consulta de dados de um determinado processo industrial de uma maneira rápida e intuitiva (Marques & Requeijo, 2021). Revela-se útil durante a perceção de como várias entidades interagem com um processo (Mishra & Kumar Sharma, 2014), sendo possível identificar as interações entre as entradas, saídas, fornecedores e clientes com um processo industrial (Marques & Requeijo, 2021). Adicionalmente, a ferramenta permite também identificar quais as entradas necessárias para se obterem as saídas pretendidas (Parkash & Kaushik, 2011).

S	I	P	O	C
SUPPLIERS (FORNECEDORES)	INPUTS (ENTRADAS)	PROCESS (PROCESSO)	OUTPUTS (SAÍDAS)	CUSTOMERS (CLIENTES)
Quem fornece os materiais / inputs?	Que recursos são necessários ou fornecidos pelo fornecedor ?	Quais processos ou atividades são desempenhados ?	Quais os produtos ou serviços resultantes do processo?	Quem são os clientes?

Figura 13 - Ferramenta SIPOC - Adaptado(Business Audit Compliance, n.d.)

2.3.2.3.4 Mapa de Processo

O Mapa de Processo é utilizado para documentar detalhadamente todas as informações conhecidas sobre um processo. O Mapa de Processo inclui todas as fronteiras, entradas, saídas e principais atividades desenvolvidas nesse processo. Assim, revela-se uma ferramenta estruturada que oferece uma representação gráfica detalhada de todas as características do processo que está a ser analisado (Sanders *et al.*, 1999).

A fim de se poder elaborar corretamente um Mapa de Processo, deverão seguir-se os seguintes passos:

1. Representação do fluxo do processo analisado;
2. Representação de entradas e saídas de cada etapa do processo;
3. Identificação dos objetivos secundários de cada etapa;
4. Listagem de todos os fatores que direta ou indiretamente afetam as saídas;
5. Categorização dos fatores nas seguintes categorias:
 - Controláveis: fatores independentes que podem ser alterados ou ajustados. Por exemplo: velocidade de uma máquina;
 - Críticos: fatores que afetam substancialmente o processo;
 - Ruído: fatores externos que interferem no processo causando variações na saída do processo. Fatores que não são controláveis, inviáveis economicamente de controlar ou escolhidos para não serem controlados. Por exemplo: temperatura ambiente da fábrica;
 - Operação Padrão: operações que precisam de ser executadas para garantir a conformidade do processo. Por exemplo: manutenção preventiva, formação e limpeza.

2.3.2.3.5 Mapa de Raciocínio

O Mapa de Raciocínio é uma ferramenta que contempla informação relativa a todas as etapas de um projeto. Assim, esta ferramenta é integrada com as questões que foram feitas ao longo do projeto, com os caminhos paralelos de trabalho que foram traçados, com teorias de conhecimento obtidas durante a realização do projeto e com a direção dos trabalhos futuros (Hild *et al.*, 1999). O Mapa de Raciocínio deve ser elaborado com os seguintes elementos:

- Um objetivo claro e quantificável do projeto;
- Informações de dados históricos relativos ao projeto;
- Questões iniciais que devem ser consideradas;
- Caminhos paralelos de trabalho;
- Ferramentas e metodologias utilizadas para obtenção de respostas às questões feitas;
- Documentação das respostas e resultados obtidos.

O Mapa de Raciocínio revela-se importante na comunicação e direcionamento de um projeto, uma vez que permite a transferência de conhecimento através da agregação de questões e respostas relativas ao objetivo principal de um determinado projeto (Hild *et al.*, 1999).

2.3.2.4 Técnicas Estatísticas Six-Sigma

O presente caso de estudo incorpora a abordagem DMAIC da filosofia *Six-Sigma*. A abordagem DMAIC utilizada apoia-se em técnicas estatísticas de como são exemplo a técnica *Measurement System Analysis* (MSA) e *Design of Experiments* (DOE).

2.3.2.4.1 *Measurement System Analysis* (MSA)

Todas as atividades de medição realizadas durante um projeto de *Six-Sigma* devem ser estritamente controladas a nível de estabilidade, discriminação, reprodutibilidade, precisão (repetibilidade) e exatidão (Cagnazzo *et al.*, 2010).

MSA é uma técnica utilizada para determinar a quantidade de variação existente num determinado processo de medição. Esta variação tem um impacto direto na variabilidade geral de um processo.

Assim, MSA torna-se necessária para avaliar o método de medição, instrumentos de medição e todo o restante processo de obtenção de medidas. Ao haver um sistema de medição validado, é possível garantir a integridade dos dados analisados nas fases seguintes de um projeto *Six-Sigma* (Cagnazzo *et al.*, 2010).

Ao não existir integridade dos dados analisados, qualquer solução ou alteração implementada num projeto *Six-Sigma* poderá não ter os efeitos desejados.

2.3.2.4.2 *Design of Experiments* (DOE)

DOE é uma técnica estruturada e organizada que é utilizada para determinar as relações existentes entre os fatores *input* (variáveis independentes) que afetam uma ou várias respostas (*output responses*). Durante a técnica DOE são realizados testes nos quais os fatores *input* são sistematicamente alterados. No final de cada teste são coletados dados. Esta técnica permite a identificação dos fatores associados a repostas otimizadas. Cada fator é composto por vários valores, denominados de níveis (Fukuda *et al.*, 2018).

A técnica DOE, quando aplicada a um processo produtivo, permite escolher qual o cenário de combinação de fatores, de entre várias possibilidades, que deve ser utilizado no respetivo processo (Roy, 2001).

A técnica DOE é composta por três fases (Wass, 2010):

- 1º) Análise: identificação dos parâmetros que presumivelmente apresentam uma maior influência na resposta analisada;
- 2º) Metodologia de Superfície de Resposta: definição do espaço ótimo de resposta;
- 3º) Validação do Modelo Experimental: confirmação das previsões.

Modelo de Experiência *Full Factorial*

O modelo de experiências *Full Factorial* inclui todas as combinações de níveis de fatores e proporciona todas as interações possíveis da experiência analisada (Wass, 2010).

O número de testes necessários para se realizar um modelo de experiências *Full Factorial* é calculado através da seguinte equação (Minitab, 2021):

$$N^{\circ} \text{ testes Full Factorial} = N^K \quad (3)$$

Aonde:

N: Número de níveis de cada fator

K: Número de fatores a analisar

2.4 *Análise de Elementos Finitos*

O caso de estudo incluiu a utilização de simulação com a finalidade da verificação de características estáticas e dinâmicas da ferramenta de inserção de estatores em carcaças de motores elétricos. Deste modo, recorreu-se à análise de elementos finitos.

Finite Element Analysis (FEA) ou análise de elementos finitos é um método de análise numérica. FEA é utilizada na resolução de problemas estruturais, vibracionais e térmicos, sejam eles simples ou complexos. Este método é preferencialmente adotado para o auxílio do desenvolvimento de produtos na fase de projeto, para testar o conceito original ou melhorias de um componente/ estrutura (Kurowski, 2013).

Esta análise fundamenta-se na discretização e na subdivisão de uma peça ou um corpo em diversos elementos. Estas subdivisões são denominadas de elementos finitos. Assim, um problema de elevada complexidade é facilmente transformado na soma de diversos problemas com um grau de complexidade inferior (Furtado, 2014).

A precisão dos resultados da FEA é diretamente afetada pela quantidade de elementos que são considerados na análise. Chama-se malha ao conjunto desses elementos finitos. Assim, quanto maior for o valor de elementos finitos presentes numa malha, mais próximos estarão os valores numéricos dos valores reais (Lottermann, 2015).

Simulação FEA

A utilização da análise de elementos finitos permite ao utilizador verificar características estáticas e dinâmicas de uma peça (YAN, 2011).

Devido às grandes vantagens desta análise, de como são exemplo a verificação de pontos de uma peça que estão sujeitos a maiores e menores tensões e a verificação de pontos com maiores deformações, existem atualmente diversos *softwares* disponíveis para a realização destas análises. De entre os vários *softwares* disponíveis um dos mais relevantes a nível de projeto mecânico é o *Solidworks*.

O *software Solidworks* permite a importação do desenho CAD (que pode ser criado no mesmo *software*) para o ambiente de simulação. De seguida é possível definir quais as condições a que a peça está submetida, de como por exemplo forças, restrições de movimento e pressões. Assim, é possível prever o comportamento de uma determinada peça através do teste virtual do seu modelo CAD.

Para ajudar o utilizador na interpretação de resultados, os *softwares* apresentam uma escala gráfica colorida cujas cores simbolizam pontos de menor/maior deformação e/ou tensões menos/mais elevadas.

2.5 Impacto do Calor em Objetos

O presente caso de estudo incluiu a análise de uma proposta de aquecimento de carcaças de motores elétricos. Deste modo, justifica-se a revisão bibliográfica sobre as temáticas de expansão térmica e transferência de calor por condução transiente.

2.5.1 Expansão Térmica

O coeficiente de expansão térmica (α) é uma propriedade característica dos materiais que é indicativa do quanto eles podem expandir aquando da ação de calor. Desta forma, diferentes substâncias expandem a diferentes níveis. A maioria dos materiais sólidos expande perante situações de aquecimento e contrai perante situações de arrefecimento (Cverna & Committee, 2002).

A alteração de dimensionamento de um determinado material sólido sob a ação da temperatura é dada pela equação (4):

$$\frac{(L_f - L_0)}{L_0} = \alpha \times (T_f - T_0) \quad (4)$$

Aonde:

L_0 = dimensão inicial do material (mm);

L_f = dimensão final do material (mm);

T_0 = temperatura inicial do material (°C);

T_f = temperatura final do material (°C);

α = coeficiente de expansão térmica (°C⁻¹).

2.5.2 Transferência de calor por condução transiente

Condução transiente caracteriza-se como o tipo de transferência de calor responsável pela mudança de temperatura em todos os pontos de um objeto com o decorrer do tempo. Este fenómeno de transferência de calor pode ser clarificado através do exemplo de um lingote de metal aquecido num forno e que após a sua remoção é exposto a uma corrente fria de ar. Nesta situação, verifica-se transferência de energia por convecção e radiação a partir da superfície para o ambiente. Por sua vez, também ocorre transferência de energia por convecção a partir do interior do metal para a sua superfície, e a temperatura em cada ponto no lingote diminui até ao momento em que a condição de um regime estacionário seja alcançada (Bergman *et al.*, 2011).

Torna-se então necessário estudar procedimentos para determinar a dependência da distribuição de temperatura no decorrer do tempo do processo transiente. Caso os

gradientes de temperatura no interior de um sólido possam ser desprezados, o método da capacidade concentrada pode ser utilizado para determinar a variação da temperatura ao longo do tempo.

Método da Capacidade Concentrada

O método da capacidade concentrada, devido à sua inerente simplicidade de aplicação, permite determinar a variação da temperatura de um determinado sólido com o decorrer do tempo de uma forma relativamente simples. Este método considera que a temperatura do sólido é uniforme espacialmente em qualquer instante durante o processo de transferência (Bergman *et al.*, 2011).

O primeiro passo que deve ser tomado é calcular o número de *Biot*. Este número fornece a medida de queda de temperatura no sólido relativa à diferença de temperatura entre a superfície do sólido e o fluido.

$$Bi = \frac{h \times Lc}{k} < 0,1, Lc = \frac{V}{As} \quad (5)$$

Aonde:

Bi= número de *Biot*;

h= coeficiente de convecção total (W/(m².K));

Lc= comprimento característico (m);

k= fator de condutividade térmica (W/m.K);

V= volume do sólido (m³);

As= Área exposta do sólido (m²).

De seguida, caso se verifique que Bi<0,1, é possível determinar o tempo necessário para o sólido alcançar uma dada temperatura T. Para calcular esse tempo recorre-se à equação (6):

$$t = \frac{\rho \times cp \times V}{h \times A} \times \ln \left(\frac{T_{inicial} - T_{infinity}}{T_{final} - T_{infinity}} \right) \quad (6)$$

Aonde:

ρ= massa específica do material (kg. m³);

cp= calor específico do material (J/kg.K);

V= volume do sólido (m³);

h= coeficiente de convecção total (W/(m².K));

A= Área exposta do sólido (m²);

Tinicial= temperatura inicial do sólido (K);

Tinfinity= temperatura do fluido (K);

Tfinal= temperatura final do sólido (K).

DESENVOLVIMENTO

3.1 FASE DEFINE

3.2 FASE *MEASURE*

3.3 FASE *ANALYSE*

3.4 FASE IMPROVE

3.5 FASE CONTROL

3 DESENVOLVIMENTO

O presente caso de estudo aborda a aplicação da filosofia *Six-Sigma* na melhoria de um problema encontrado na Indústria Elétrica. O desenvolvimento do projeto baseou-se na abordagem do DMAIC. O presente capítulo contém a descrição detalhada de cada uma das etapas da abordagem DMAIC.

Na tabela 3 estão mencionadas quais as ferramentas e técnicas *Six-Sigma* utilizadas em cada uma das fases da abordagem do DMAIC. Importa referir que a ferramenta mapa de raciocínio, representada na figura 14, esteve presente em todas as fases da abordagem implementada uma vez que contempla informação relativa a todas as etapas do caso de estudo.

Tabela 3 - Ferramentas e Técnicas utilizadas na filosofia Six-Sigma

D	M	A	I	C
Define	Measure	Analyse	Improve	Control
Análise Gráfica	Diagrama de Pareto	5 Why's	Plano de Implementação	Relatório de Verificação
SIPOC	Análise Gráfica	Brainstorming	DOE	Mapa de Raciocínio
Fluxograma	Mapa de Raciocínio	Mapa de Processo	Cartas de Controlo	
Mapa de Raciocínio		Ishikawa	Análise Gráfica	
		MSA	Mapa de Raciocínio	
		Carta de Controlo		
		Mapa de Raciocínio		

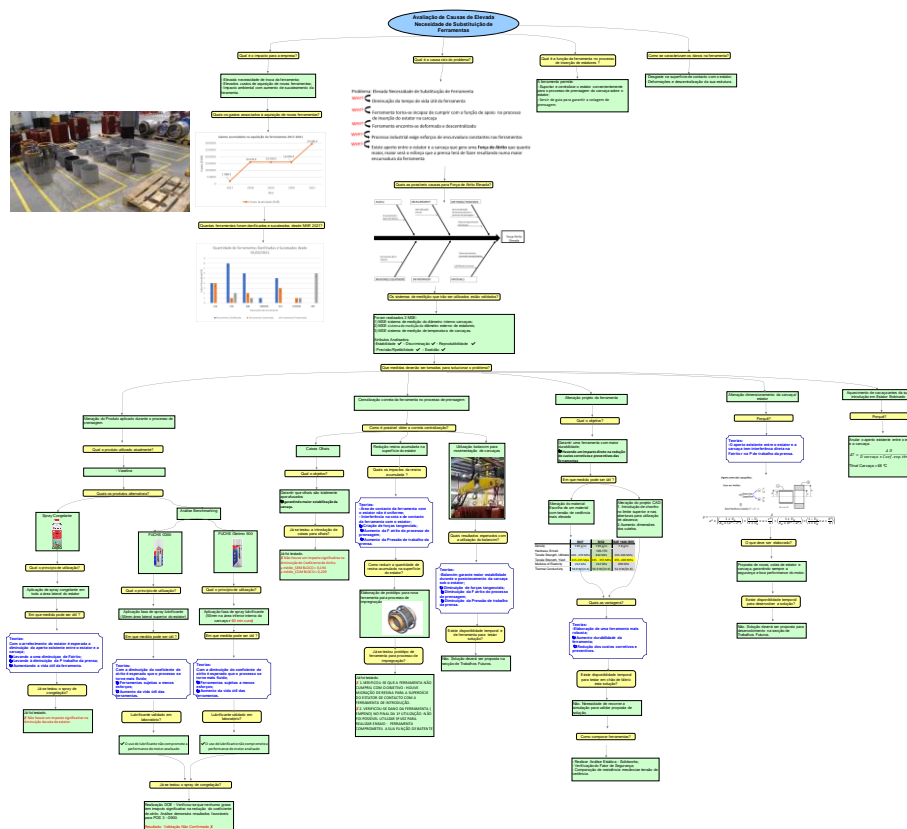


Figura 14 - Mapa de Raciocínio

3.1 Fase Define

A fase *Define*, sendo a fase inicial da abordagem do DMAIC, compreende a definição completa do enquadramento do problema do caso de estudo. Assim, foram definidos aspetos relevantes para o bom entendimento do processo industrial aonde a ferramenta de estatores se encontra inserida. Importa também referir que nesta fase foi gerada uma equipa de trabalho multidisciplinar responsável pelo acompanhamento de todas as fases da metodologia DMAIC.

O caso de estudo centraliza-se na análise de uma ferramenta utilizada na indústria elétrica. A ferramenta é utilizada no processo de inserção de estatores em carcaças de motores elétricos e apresenta as seguintes funções:

- Suporte e centralização conveniente do estator durante o processo de prensagem de carcaça sobre o estator;
- Auxílio na garantia de cotagem de prensagem.

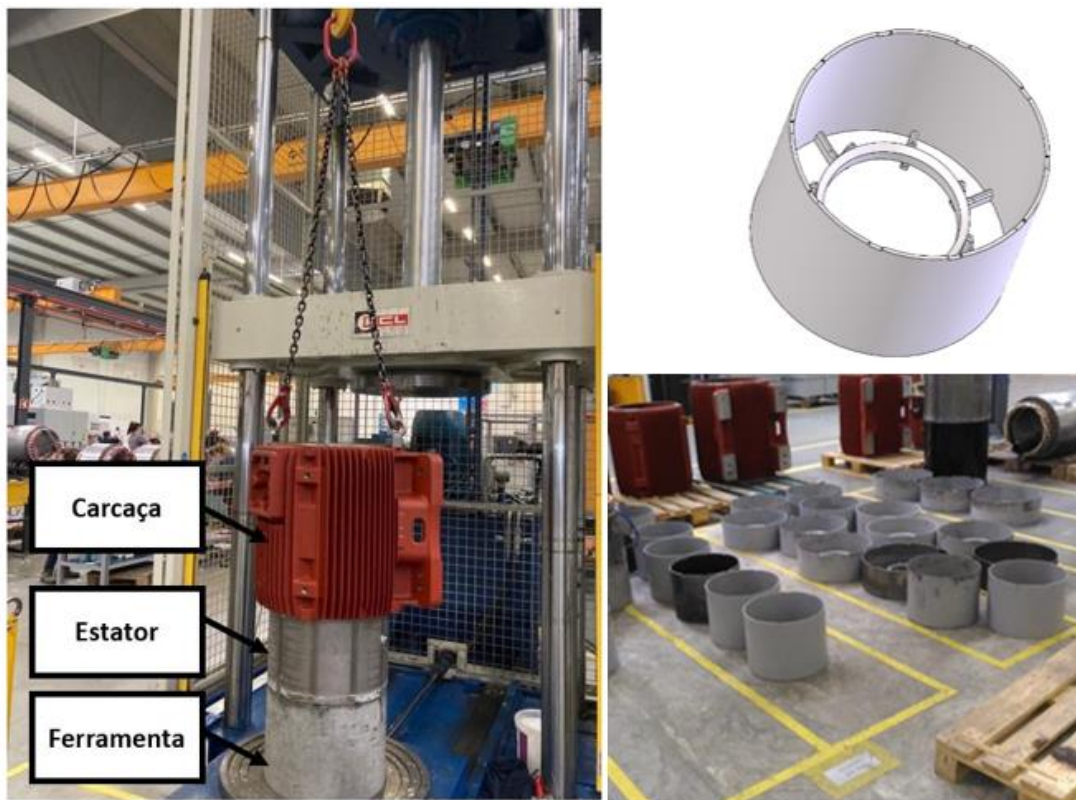


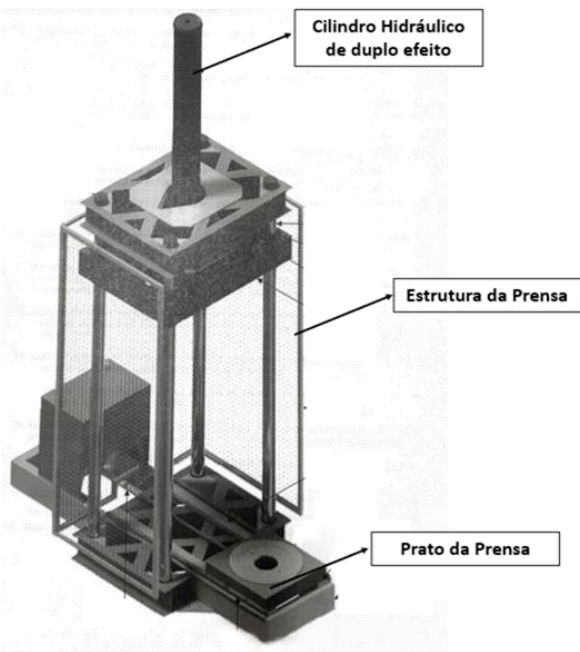
Figura 15 - Ferramenta de inserção de estatores em carcaças de motores elétricos

O processo de inserção de estatores em carcaças inclui a prensagem a frio da carcaça no estator do motor elétrico. Deste modo, durante o processo de prensagem a frio, a ferramenta é alocada no prato da prensa e serve de suporte do estator. Posteriormente, a carcaça do motor é colocada no topo do estator. Devido à relação de aperto entre os dois componentes, como o diâmetro externo real do estator é superior ao diâmetro interno real da carcaça, é necessária uma força de prensagem para se proceder ao acoplamento destes dois componentes. Deste modo, a força debitada pela prensa hidráulica é responsável pela introdução a frio da carcaça no estator do motor elétrico.

A prensa hidráulica é constituída por quatro colunas de guiamento, dois estrados fixos (um superior e outro inferior que tem incorporado um prato inferior móvel com deslocação horizontal acionada por um cilindro hidráulico de duplo efeito). O cilindro hidráulico de duplo efeito é responsável pelo movimento vertical e horizontal do estrado móvel. Este cilindro é também responsável pela pressão de prensagem que é lida no manómetro do equipamento. A tabela 4 apresenta as principais características da prensa hidráulica utilizada no processo de prensagem de estatores.

Tabela 4 - Características da prensa hidráulica utilizada no processo de prensagem de estatores

Característica	Valor
Capacidade de carga (kgf)	100 000
Velocidade de aproximação (mm/s)	50
Velocidade de trabalho (mm/s)	10
Velocidade de recuo (mm/s)	50
Pressão Hidráulica Máxima (Bar)	250



Para cada valor de pressão lido no manómetro da prensa hidráulica está associado um determinado valor de força de prensagem. A figura 16 apresenta a relação existente entre estas duas grandezas, baseada no manual do equipamento.

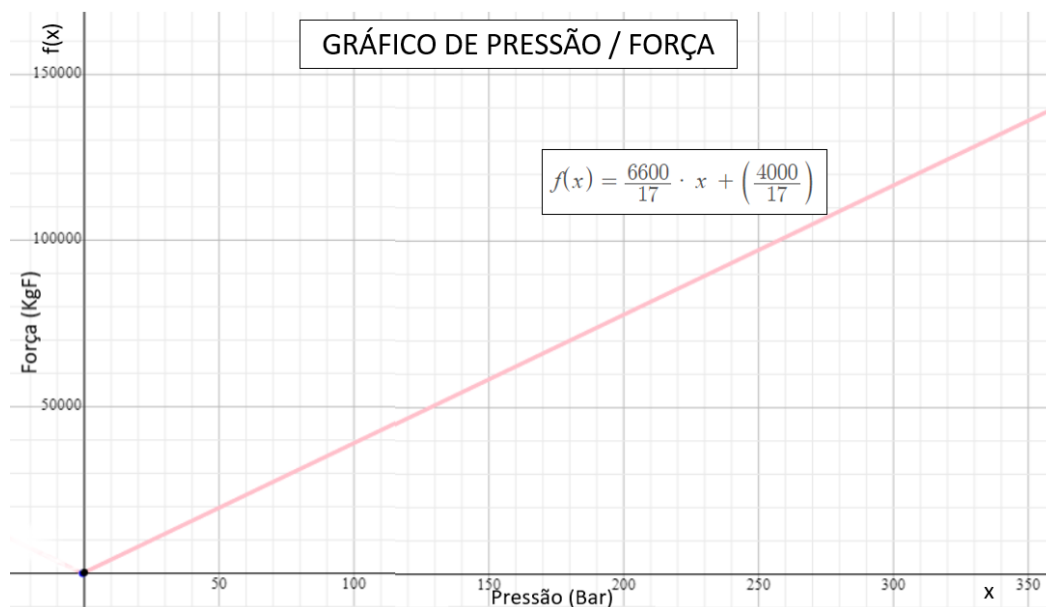


Figura 16 - Gráfico de Pressão / Força da Prensa Hidráulica

Para se proceder à resolução do problema, foi implementada a abordagem do DMAIC de modo a reduzir a necessidade de substituição da ferramenta utilizada no processo de inserção de estatores de motores elétricos através do aumento da sua vida útil.

Primeiramente, analisaram-se as razões que levaram à necessidade de substituição da ferramenta. Verificou-se que o sucateamento da ferramenta ocorreu devido deformação e ovalização.



Figura 17 - Ovalização da ferramenta

Na tentativa de prolongamento da vida útil destas ferramentas, estas peças passaram pelo processo de torneamento a fim de reduzir ovalização à peça através da remoção de material em excesso. O processo de torneamento, realizado em torno vertical, foi responsável pela repetida diminuição da espessura da ferramenta, provocando a consequente diminuição da robustez da peça.



Figura 18 - Diminuição da espessura da ferramenta

No chão de fábrica estão presentes ferramentas com *design* semelhante, porém, com dimensões diferentes. Existe um tipo de ferramenta para cada tipo de altura de eixo de

motor elétrico que é produzido. Como existe a produção de motores elétricos com cinco alturas de eixo diferentes, existem cinco tipos de ferramentas:

Tabela 5 - Tipo de Ferramentas

Tipo de Ferramentas – Por Altura de Eixo do Motor Elétrico				
Ferramenta	Ferramenta	Ferramenta	Ferramenta	Ferramenta
225	250	280	315	355

Deste modo, para caracterizar convenientemente o problema, analisaram-se os gastos de aquisição de novas ferramentas e a evolução do custo unitário de ferramenta.

De 2017 a 2021 foram gastos € 29 486 na aquisição de novas ferramentas. O gráfico presente na figura 19 apresenta a distribuição de gastos acumulados de aquisição de ferramentas desde 2017 até 2021.

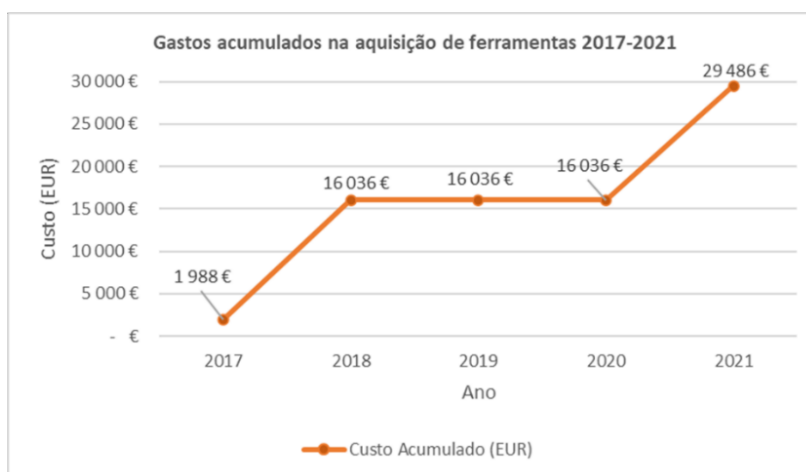


Figura 19 - Gastos acumulados na aquisição de ferramentas 2017 - 2021

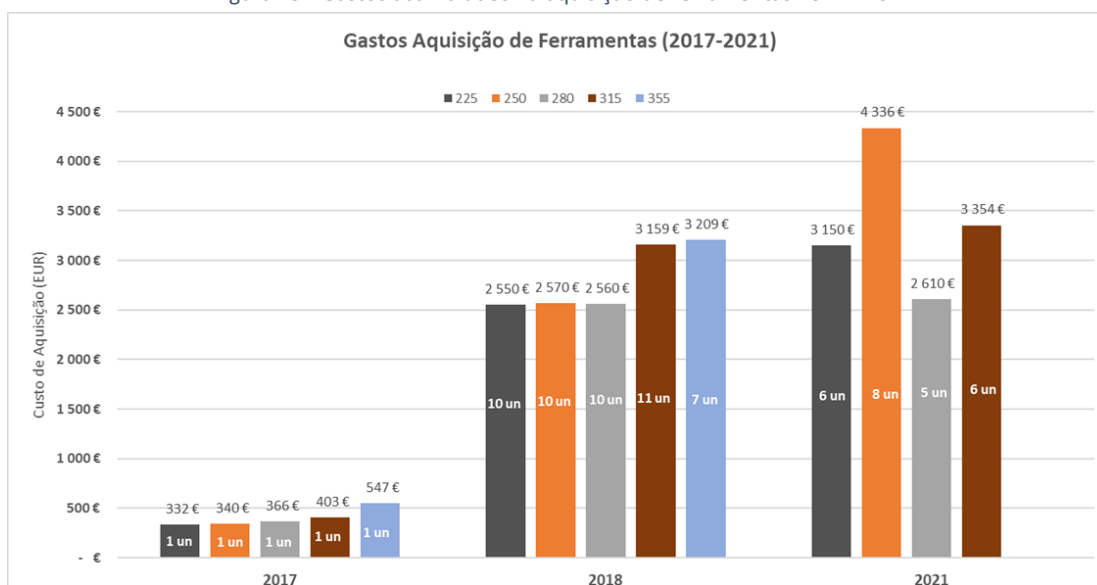


Figura 20 - Gastos anuais de aquisição de ferramentas – Por tipo de ferramenta

O gráfico presente na figura 20 apresenta os gastos anuais de aquisição de ferramentas de 2017 a 2021, segregados pelo tipo de ferramentas. Também está presente no gráfico a quantidade de ferramentas adquiridas em cada período.

É importante referir que o custo de aquisição de cada tipo de ferramenta não se manteve constante ao longo do período de tempo analisado (2017-2021). Deste modo, analisou-se a evolução do custo médio unitário de ferramenta e evolução do custo unitário de cada tipo de ferramenta desde 2017 até 2021.

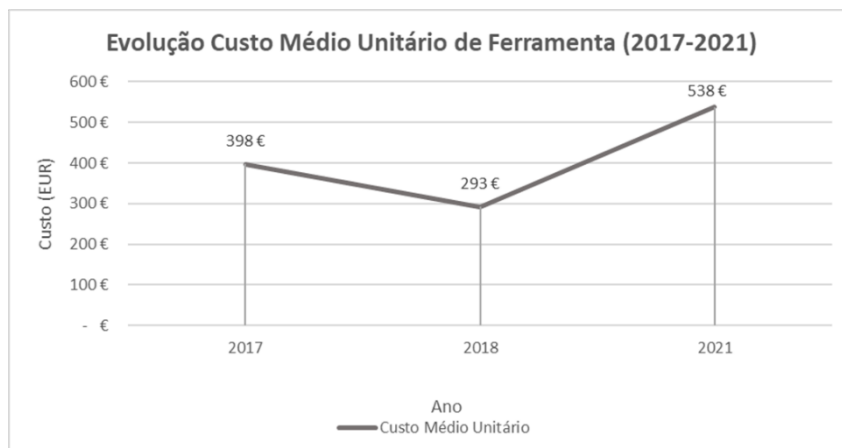


Figura 21 - Evolução do custo médio unitário de ferramenta de 2017 a 2021

Como é possível verificar na figura 21 o custo médio unitário de aquisição de ferramenta atingiu valor máximo no ano de 2021, com um custo médio de aquisição de ferramenta de € 538.

O gráfico presente na figura 22 apresenta a evolução do custo unitário de cada tipo de ferramenta desde 2017 até 2021.

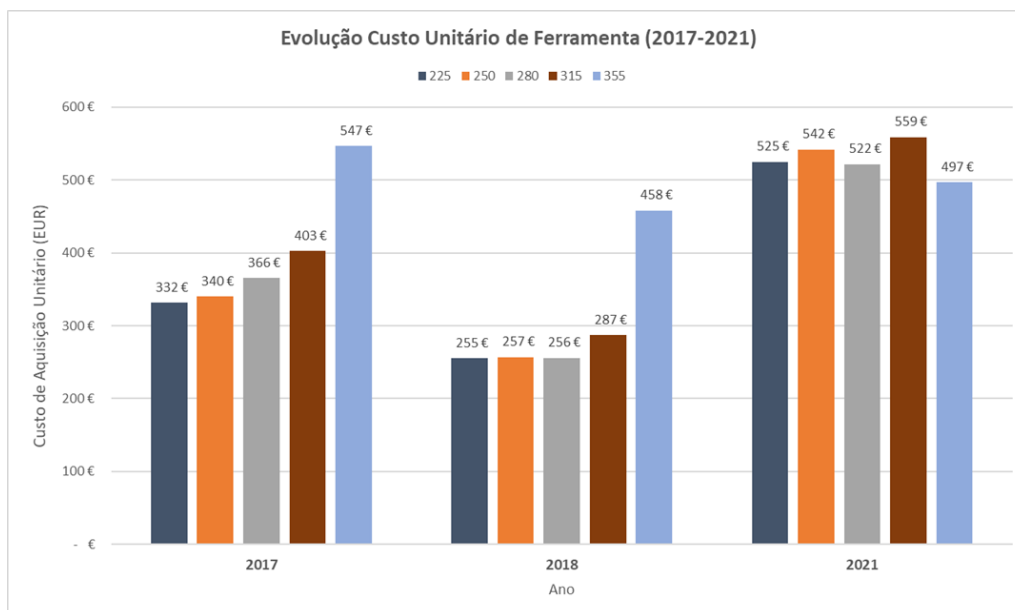


Figura 22 - Evolução do custo unitário de cada tipo de ferramentas - 2017 a 2021

Desta forma, verificando-se o incremento significativo do custo unitário de aquisição de ferramenta no ano de 2021 justificou-se a aplicação da abordagem DMAIC com a finalidade da mitigação da necessidade de aquisição de novas ferramentas. É importante referir que através da redução da necessidade de substituição de ferramenta, o impacto ambiental causado pelo sucateamento de ferramenta é reduzido.

De seguida, utilizou-se a ferramenta SIPOC para perceber de maneira rápida e intuitiva as interações entre as entradas, saídas, fornecedores e clientes do processo industrial de inserção de estatores em carcaças de motores elétricos.

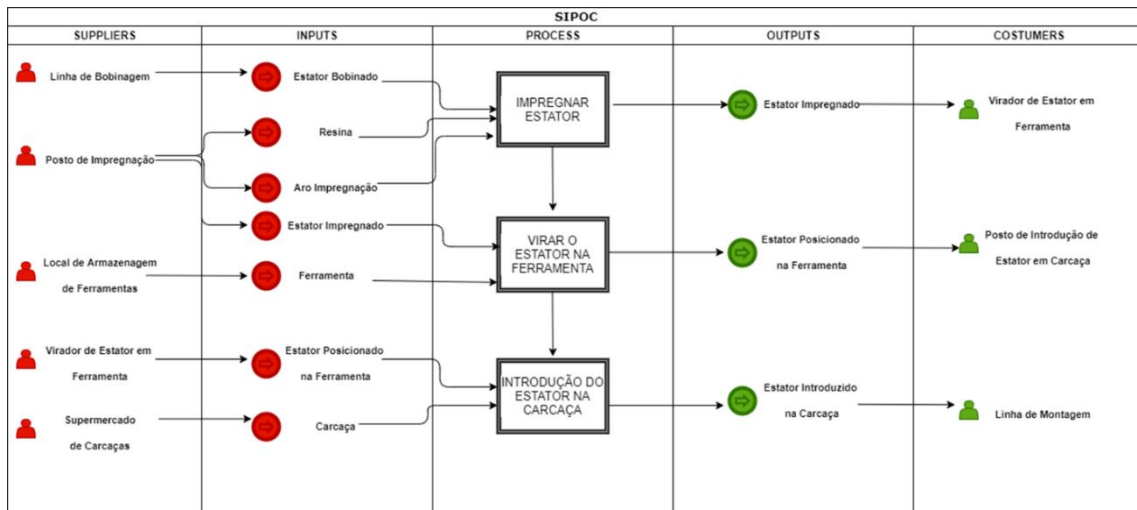


Figura 23 - Ferramenta SIPOC - Processo de Inserção de Estatores em Carcaças

O diagrama SIPOC foi utilizado com o objetivo de mapear o processo de inserção de estatores em carcaças e delimitar o seu âmbito. Foram referidos vários tipos de fornecedores que foram responsáveis por providenciar as entradas ao processo. Os fornecedores considerados foram a linha de bobinagem, posto de impregnação, local de armazenagem de ferramentas, virador de estator em ferramenta e supermercado de carcaças, todos fornecedores internos. O processo foi definido segundo um fluxograma que apresenta a sequência das atividades nas quais das entradas consideradas resultam saídas para os respetivos clientes. Os clientes considerados foram o virador de estator em ferramenta, o posto de introdução de estator em carcaça e a linha de montagem, todos clientes internos. Pode então inferir-se que esta ferramenta permitiu destacar de uma maneira macroscópica a informação relevante para o entendimento do processo de inserção de estatores em carcaças.

A fase *Define* terminou a elaboração do *Project Charter* representado na figura 24. Elaborou-se, então, um pequeno documento com informações relativas ao âmbito do projeto, descrição do problema, *background* do problema, objetivos e metas expectáveis, cronograma do projeto e participantes do projeto.

PROJECT CHARTER						
Título do Projeto: Avaliação do aumento da vida útil de uma ferramenta utilizada na indústria elétrica.						
Problema: - Elevada necessidade de substituição da ferramenta de inserção de estatores em carcaças de motores elétricos;						
Background do Problema: - De 2017 a 2021 foram gastos € 29 486 na aquisição de novas ferramentas; - O custo médio unitário de aquisição de ferramenta atingiu valor máximo no ano de 2021, com um custo médio de aquisição de ferramenta de € 538.						
Metas Expectáveis: Aumento da vida útil da ferramenta de inserção de estatores em carcaças de motores elétricos. Aumento da durabilidade da ferramenta, diminuição de custos corretivos e preventivos e diminuição do gasto anual em aquisição de novas ferramentas. Diminuição do impacto ambiental causado pelo sucateamento de ferramenta.						
Cronograma do Projeto:				Líder do Projeto: C.Neves		
INÍCIO DO PROJETO	01/05/2021					
	mai/21	jun/21	jul/21	ago/21		
Define	█					
Measure		█	█			
Analyse + Improve			█	█	█	
Control					█	█
				Membros da Equipa: C.Neves; S.Sousa; A. Rebelo; A. Ferreira; D. Pinheiro.		

Figura 24 - Project Charter

3.2 Fase Measure

Na fase *Measure* da abordagem do DMAIC foram recolhidos dados mensuráveis com o objetivo de proceder a uma análise da situação inicial do problema.

Primeiramente, foi feito um levantamento da quantidade e respetiva percentagem de ferramentas danificadas, sucateadas e preservadas durante o período entre março e maio de 2021. De notar que por ferramentas preservadas entendem-se ferramentas sem deformações nem ovalizações. Para isso, recorreu-se à análise gráfica para correlacionar o estado da ferramenta com o tipo de ferramenta. O gráfico presente na figura 25 representa a quantidade de ferramentas danificadas, sucateadas e preservadas e o gráfico da figura 26 representa a respetiva percentagem.

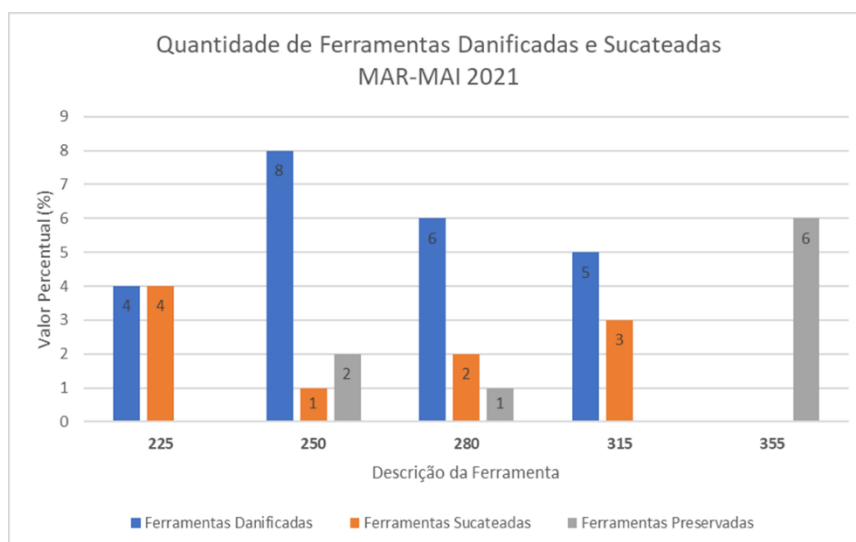


Figura 25 - Quantidade de ferramentas danificadas e sucateadas - março a maio de 2021

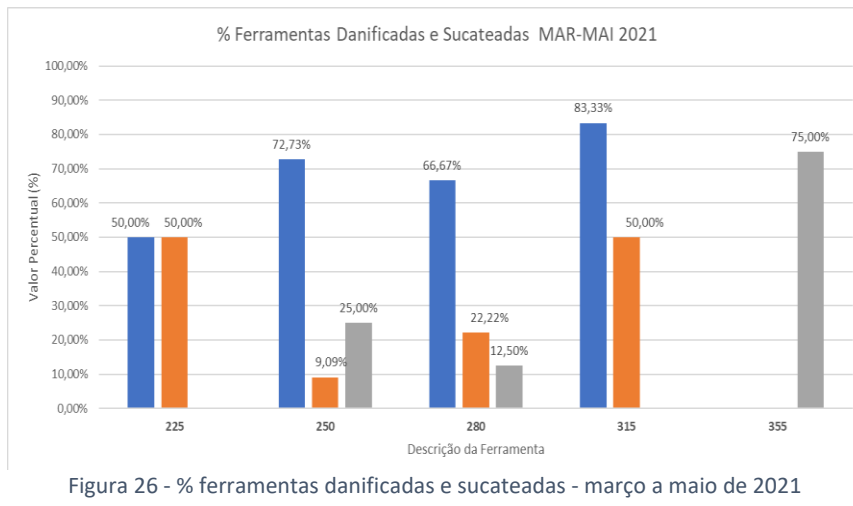


Figura 26 - % ferramentas danificadas e sucateadas - março a maio de 2021

De seguida, utilizou-se a ferramenta diagrama de pareto para perceber qual o tipo de ferramenta que mais contribuiu para o problema de dano. Foi então formulado o diagrama de pareto (baseado na quantidade de ferramentas danificadas presentes em chão de fábrica). Neste caso, verificou-se que a ferramenta 250 foi a ferramenta que mais contribuiu para o problema analisado. Assim sendo, decidiu-se focalizar o seguimento da abordagem do DMAIC na ferramenta 250.

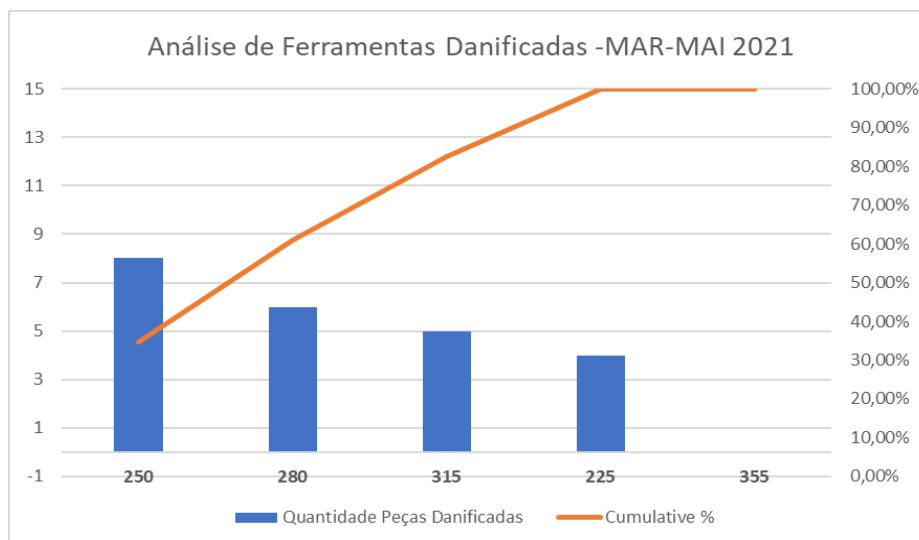


Figura 27 - Pareto de ferramentas danificadas

3.3 Fase Analyse

A fase *Analyse* teve como objetivo determinar as possíveis causas raiz do problema de elevada necessidade de substituição de ferramenta. Desta forma, nesta fase da abordagem do DMAIC recorreram-se às ferramentas Mapa de Processo, *5 Why's*, *brainstorming* e diagrama Ishikawa para determinar as possíveis causas raiz do

problema e à técnica MSA para validar o sistema de medição utilizado na recolha de dados do caso de estudo.

3.3.1 Determinação da causa raiz do problema

Recorreu-se à ferramenta 5 *Why's* para perceber qual a causa raiz do problema de elevada necessidade de substituição de ferramenta. Após realizada a pergunta “Porquê?” cinco vezes consecutivas, durante uma sessão de *brainstorming*, chegou-se à causa raiz do problema: **Existe aperto entre o estator e a carcaça que gera uma Força de Atrito que quanto maior, maior será o esforço que a prensa terá de fazer resultando numa maior encurvadura da ferramenta.**

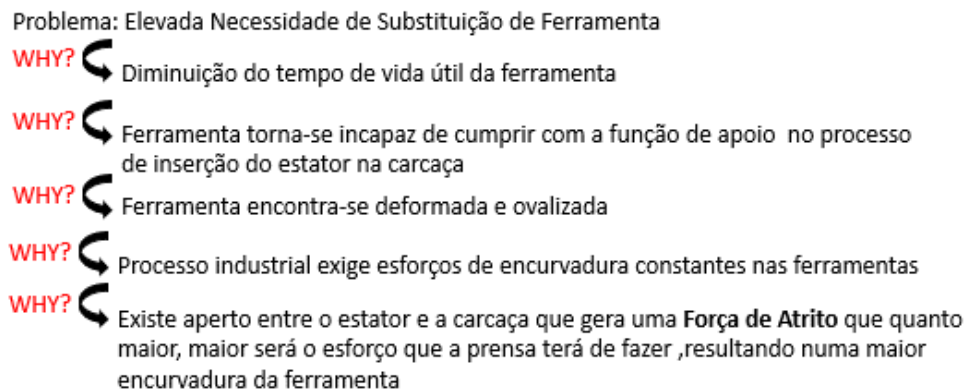


Figura 28 - 5 *Why's* do problema de elevada necessidade de substituição de ferramenta

Assim sendo, verificou-se que a força de atrito resultante da montagem do estator e da carcaça seria responsável pela encurvadura da ferramenta. Quanto maior fosse o valor da força de atrito existente durante a prensagem da carcaça sobre o estator, maior seria a tensão a que a ferramenta estaria exposta e, conseqüentemente, maior seria a tendência da ferramenta em deformar-se.

Foi então necessário proceder a um cálculo de modo a ser possível comprovar teoricamente a validade de futuras sugestões de melhoria. Uma vez que os estatores de motores com altura de eixo 250 não têm todos a mesma altura, a área de contacto entre todos os estatores e carcaças não é a mesma. Logo, como a força de atrito depende da área de contacto dos dois elementos, decidiu-se formular uma base de cálculo do coeficiente de atrito, μ . Importa referir que se considerou a força de atrito máxima entre os dois componentes que corresponde ao momento em que toda a área lateral do estator se encontra em contacto com a carcaça.

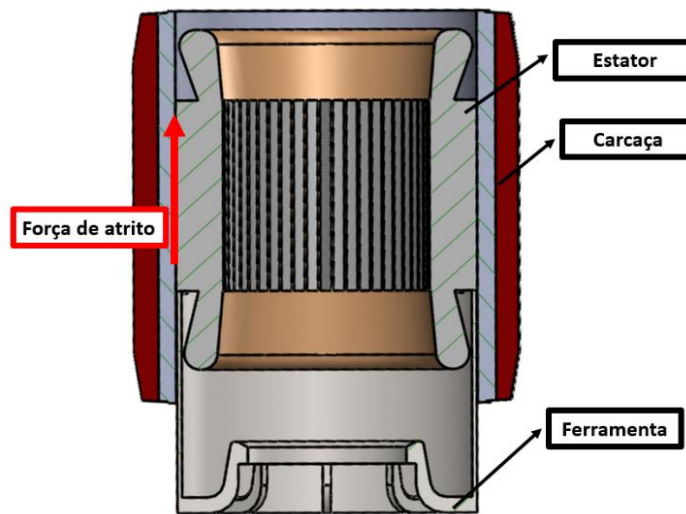


Figura 29 - Força de atrito entre o estator e carcaça

3.3.2 Cálculo Teórico do Coeficiente de Atrito (μ)

A fim de se poder elaborar uma base de cálculo do coeficiente de atrito (μ), efetuou-se a aproximação deste caso de acoplamento para uma situação de aperto entre dois casquilhos.

Tabela 6 - Esquemática de acoplamento entre dois casquilhos

	Aperto	δ
a	Raio interno da carcaça	
b	Raio externo da carcaça	
c	Raio interno do estator	
d	Raio externo do estator	

1ª) O coeficiente de atrito foi calculado segundo a equação (7):

$$\mu = \frac{FA (N)}{P \text{ contacto} * \text{Área Lateral}} \quad (7)$$

Aonde:

FA = força de atrito (N);

P contacto = pressão de contacto entre os dois componentes (MPa);

Área lateral = área de contacto entre os dois componentes (mm^2);

2ª) Admitiu-se que a $FA (N) = F$ prensagem (N) (8)

$$F \text{ prensagem (N)} = \frac{F \text{ Prensagem (kgf)}}{0,10197} \quad (9)$$

O valor de força de prensagem (F Prensagem) foi calculado através da equação presente no gráfico da figura 15 que associa o valor de pressão lido no manómetro da prensa hidráulica a uma força de prensagem.

$$F \text{ prensagem (kgf)} = \frac{6600}{17} \times P_{\text{lida_manómetro}} + \frac{4000}{17} \quad (10)$$

Aonde:

F prensagem = força de prensagem (kgf);

$P_{\text{lida_manómetro}}$ = valor de pressão de prensagem mostrado no manómetro da prensa hidráulica (Bar);

3º) O valor de P contacto foi calculado segundo a equação (11):

$$p \text{ contacto} = \frac{\delta}{a^2 \times \left[\left(\frac{1 + \nu_A}{E_A \times (a^2 - c^2)} \right) \times \left(\frac{1 - \nu_A}{1 + \nu_A} \times a + \frac{c^2}{a} \right) + \left(\frac{1 + \nu_B}{E_B \times (b^2 - a^2)} \right) \times \left(\frac{1 - \nu_B}{1 + \nu_B} \times a + \frac{b^2}{a} \right) \right]} \quad (11)$$

Aonde:

a = raio interno da carcaça (mm);

b = raio externo da carcaça (mm);

c = raio interno do estator (mm);

d = raio externo do estator (mm);

δ = aperto = $d - a$ (mm); (12)

E_A = módulo de elasticidade do material do estator (MPa);

E_B = módulo de elasticidade do material da carcaça (MPa);

ν_A = Coeficiente de Poisson do material do estator (-);

ν_B = Coeficiente de Poisson do material da carcaça (-).

4º) O valor da Área Lateral foi calculado segundo a equação (13):

$$\text{Área Lateral} = 2 \times \pi \times (2 \times d) \times \text{altura estator} \quad (13)$$

Aonde:

altura do estator = valor da altura da chapa do estator (mm);

d = raio externo do estator (mm).

Depois da formulação da base de cálculo do coeficiente de atrito, reuniram-se condições para calcular o valor de μ experimental que irá servir de valor de referência para as condições iniciais de prensagem.

3.3.3 Determinação do valor μ experimental

Foi necessário estabelecer-se um valor de μ experimental de modo a ser possível comparar esse valor de referência com valores obtidos em propostas de solução do problema descrito.

Para isso, acompanharam-se várias inserções de estatores em carcaças em condições *standard* de operação em chão de fábrica:

- Prensagem a frio;
- Aplicação de vaselina (como produto lubrificante) na posição representada na figura 30.

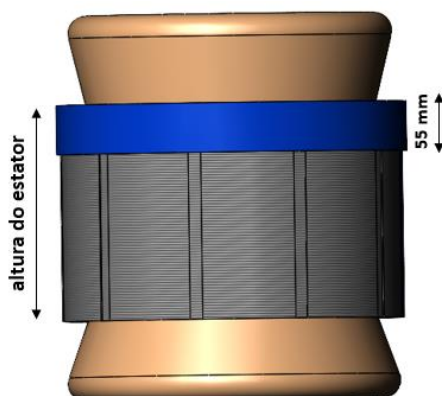


Figura 30 - Zona de aplicação de vaselina - condição *standard*

O valor de μ experimental foi calculado através da fórmula de cálculo apresentada na **secção 3.3.2** da presente dissertação. A fim da resolução do cálculo, foram considerados os seguintes parâmetros:

Tabela 7 - Parâmetros considerados no cálculo de μ

Parâmetro	Valor	Observações
a	raio interno da carcaça (mm)	Valor medido em cada amostra
b	raio externo da carcaça (mm)	Valor presente no desenho da carcaça
c	raio interno do estator (mm)	Valor medido em cada amostra
d	raio externo do estator (mm)	Valor presente no desenho do estator
E_A	150000 MPa	Valor considerado para material do estator
E_B	92 400 MPa	Valor considerado para material da carcaça – FC200 (Matmatch, n.d.-b)
U_A	0,30	Valor considerado para material do estator
U_B	0,21	Valor considerado para material da carcaça FC200 (Matmatch, n.d.-b)

Como é possível verificar na tabela 7, o valor do aperto foi calculado utilizando valores medidos em cada amostra. Desta maneira, em cada acompanhamento foi medido o diâmetro interno da carcaça com recurso a um micrómetro de interiores, e foi medido o diâmetro externo do estator com recurso a um micrómetro de exteriores. Antes de ser realizada qualquer medição foi necessário primeiro validar os sistemas de medição utilizados para se assegurar que as medições foram feitas de maneira confiável. Para isso, realizou-se a técnica MSA nos dois sistemas de medição. A técnica MSA encontra-se mencionada na **secção 3.3.6** da presente dissertação.

Desta forma, foram acompanhadas 26 inserções de estatores em carcaças de motores elétricos. Os restantes dados utilizados na base de cálculo encontram-se representados no Anexo 7.1. A tabela 8 apresenta os valores utilizados no cálculo do coeficiente de atrito (μ).

Tabela 8 - Valores utilizados no cálculo do coeficiente de atrito (μ)

Nº Análise	A lateral (mm^2)	P contacto (MPa)	FA (N)	μ
#1	358152,558	5,891	443952,815	0,210
#2	429837,733	4,674	443952,815	0,221
#3	334337,296	7,540	447760,103	0,178
#4	334338,762	8,192	436338,240	0,159
#5	334310,907	5,439	443952,815	0,244
#6	322372,645	4,256	451567,391	0,329
#7	237537,391	7,854	405879,939	0,218
#8	316697,463	3,939	436338,240	0,350
#9	237539,590	9,562	417301,802	0,184
#10	346887,226	3,447	413494,514	0,346
#11	407180,096	2,797	466796,541	0,410
#12	316701,128	4,506	421109,089	0,295
#13	499513,232	4,321	478218,404	0,222
#14	666067,908	2,794	516291,281	0,277
#15	499536,794	2,705	542942,295	0,402
#16	932442,293	2,752	565786,020	0,220
#17	932580,104	2,087	459181,966	0,236
#18	932486,275	2,335	504869,418	0,232
#19	932477,478	2,409	558171,445	0,248

#20	799306,622	3,345	535327,719	0,200
#21	1055710,011	4,143	527713,144	0,121
#22	999009,813	4,125	542942,295	0,132
#23	772825,353	4,324	451567,391	0,135
#24	1357428,150	4,589	611473,472	0,098
#25	1545612,063	2,795	527713,144	0,122
#26	1451606,506	3,938	660968,212	0,116

De seguida, os valores obtidos do coeficiente de atrito (μ) foram inseridos no *software* estatístico JMP. Os dados foram analisados através da elaboração de uma carta de controlo. Verificou-se que os dados se encontram dentro dos limites de controlo, logo, validou-se a ausência de causas especiais nos dados coletados.

A carta R (*Moving Range*) foi inicialmente examinada e verificou-se que a variação do processo analisado se encontrava sob controlo. De seguida a carta Xbarra foi analisada e permitiu a representação gráfica da média dos valores de μ obtidos. A média dos valores obtida no *software* foi de 0,227. Deste modo, estabeleceu-se o valor de $\mu = 0,227$ como o valor de referência de μ experimental da condição inicial do problema.

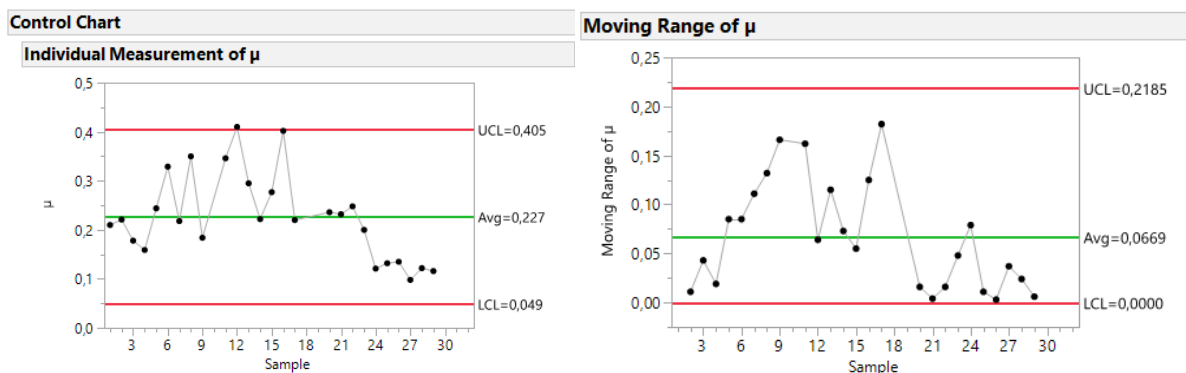


Figura 31 - Cartas de controlo - μ das condições iniciais

3.3.4 Elaboração do Mapa de Processo

De modo a ser possível conhecer mais aprofundadamente o processo e perceber quais os fatores críticos ao problema de elevado coeficiente de atrito elaborou-se o mapa de processo representado na figura 32.

O mapa de processo incluiu a representação do fluxo do processo analisado, compreendendo as atividades principais identificadas previamente no fluxograma presente no SIPOC: impregnar o estator e realizar limpeza, virar o estator na ferramenta e introdução do estator na carcaça. Cada atividade foi associada a uma saída (Y). De seguida, elaborou-se uma listagem de todos os fatores que direta ou indiretamente afetam as saídas. Este passo foi especialmente importante dado que permitiu a identificação de fatores críticos - fatores assinalados com X na coluna (CC). Foram também categorizados os fatores que podem ser controlados - parâmetros assinalados com C na coluna (Cr) - e os fatores que não podem ser controlados - parâmetros assinalados com N na coluna (Cr).

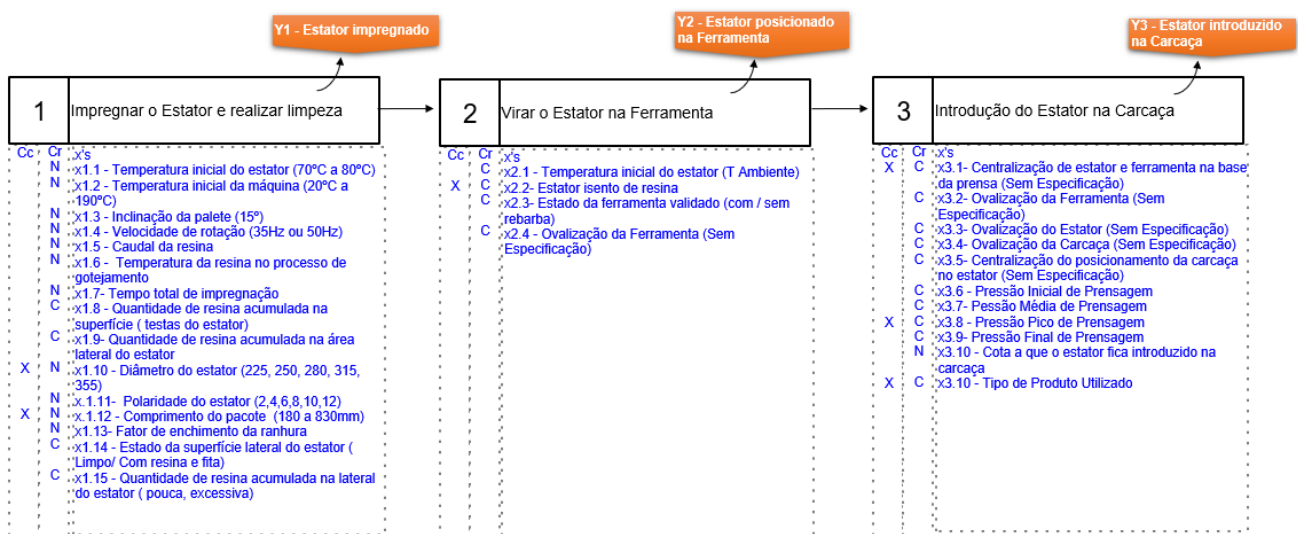


Figura 32 - Mapa do processo de inserção de estatores em carcaças

Desta forma, foi recolhida informação relativa a todos os fatores críticos que afetam substancialmente o processo.

3.3.5 Identificação das Causas Críticas do Coeficiente de Atrito (μ) Elevado

Foi necessário identificar as causas mais críticas do coeficiente de atrito (μ). Durante uma sessão de *brainstorming* foram identificadas as possíveis causas do coeficiente de atrito elevado através da utilização da ferramenta diagrama de Ishikawa.

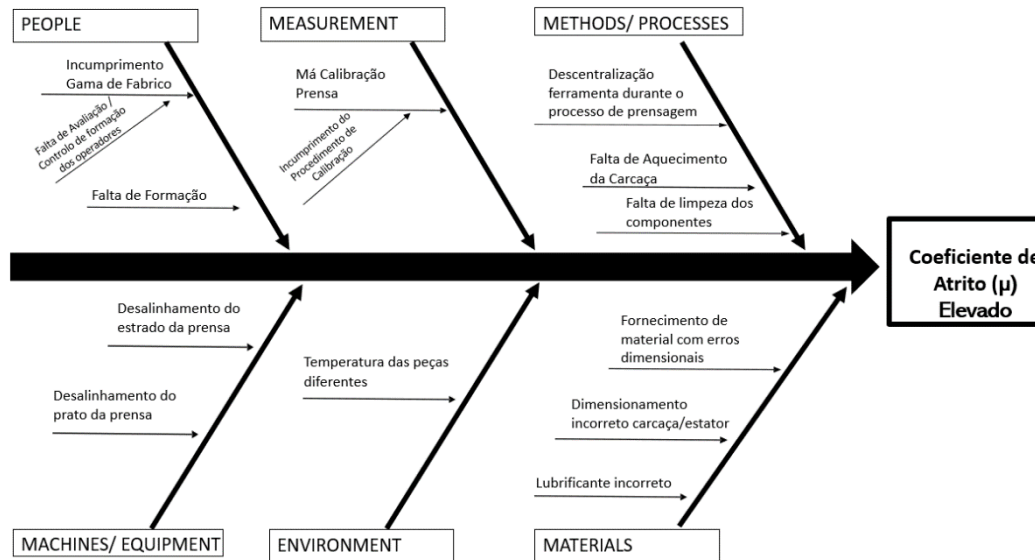


Figura 33 - Diagrama de Ishikawa - coeficiente de atrito elevado

De seguida, em reunião *brainstorming*, foram seleccionadas quais as causas mais críticas do coeficiente de atrito elevado. Para as causas críticas seleccionadas foram desenvolvidos planos de melhoria.

Tabela 9 - Causas mais críticas do coeficiente de atrito elevado

Causa Crítica	Estudo de melhoria
Produto aplicado (Lubrificante) incorreto	Estudo de alteração do produto de aplicado
Descentralização do Estator/ Carçaça	Avaliação de propostas de centralização correta dos componentes no processo de prensagem
Falta de aquecimento da carçaça	Avaliação da proposta de aquecimento da carçaça

3.3.6 MSA – Measurement System Analysis

A fim de se poder elaborar um plano de melhoria na abordagem do DMAIC, foi necessário previamente assegurar que as medições foram feitas de forma confiável e que os dados retirados das mesmas foram fidedignos.

O presente caso de estudo incluiu a recolha de dados referentes aos seguintes tipos de medição:

- Medição do valor de pressão da prensa hidráulica;
- Medição do diâmetro interno de carçaças;
- Medição do diâmetro externo de estatores;

- Medição do valor de temperatura de carcaças.

Relativamente à medição dos valores de pressão da prensa hidráulica lidos no seu manómetro analógico da marca AFRISO, a equipa de manutenção da unidade industrial na qual o presente caso de estudo foi desenvolvido garantiu a conformidade da calibração do manómetro do equipamento industrial.

Desta forma, foram realizadas três análises MSA: uma análise MSA ao sistema de medição do diâmetro interno de carcaças, uma análise MSA ao sistema de medição do diâmetro externo de estatores e uma análise MSA ao sistema de medição de temperatura de carcaças.

O objetivo da análise MSA é a obtenção de informações importantes relativamente ao sistema de medição utilizado. A variação total de um sistema de medição provém de duas fontes de variação: fontes de variação de produção/processo e fontes de variação de medição. A principal finalidade desta análise foi manter a variação de medição a um nível suficientemente baixo que permitisse a identificação de variações do processo analisado.

Para ser possível proceder à medição do diâmetro interno de carcaças utilizaram-se dois micrómetros centesimais da marca Mitutoyo. Para se proceder à medição do diâmetro externo de estatores utilizou-se um micrómetro centesimal e um micrómetro milesimal, ambos da marca Mitutoyo. Para medir a temperatura das carcaças utilizaram-se dois termómetros: um termómetro de contacto da marca SKF e um termómetro de infravermelhos da marca FLUKE.

As fontes de variação de processo que foram consideradas em cada análise MSA foram as diferentes peças analisadas e as fontes de variação de medição que foram consideradas foram os diferentes operadores e os diferentes instrumentos de medição.

Posteriormente, em cada análise MSA representou-se uma árvore de amostragem constituída pelas amostras a serem analisadas.

De seguida, procedeu-se à avaliação dos seguintes atributos do sistema de medição (Industrial, 2008):

- Estabilidade: Ausência de desvio temporal das medidas. O sistema de medição não apresenta tendências de medição nem causas especiais de medição.
- Discriminação: capacidade de os equipamentos de medição captarem variações de medição;
- Reprodutibilidade: concordância entre os resultados das medições obtidas de uma mesma grandeza realizadas em variadas condições de medição;
- Precisão/ Repetibilidade: capacidade de um equipamento de medição gerar resultados muito próximos, em repetidas amostras da mesma grandeza e sobre as mesmas condições de medição;

- **Exatidão:** concordância entre o resultado de uma medição e o verdadeiro valor dessa grandeza.

3.3.6.1 MSA – Diâmetro Interno de Carcaças

A primeira etapa do desenvolvimento da análise MSA ao sistema de medição do diâmetro interno de carcaças passou pela elaboração da estratégia de amostragem.

Elaborou-se uma árvore de amostragem que contempla 3 peças diferentes para análise, 3 operadores diferentes, 2 tipos de instrumentos de medição e 2 pontos a analisar em cada peça. Garantiram-se 3 medições no mesmo ponto.

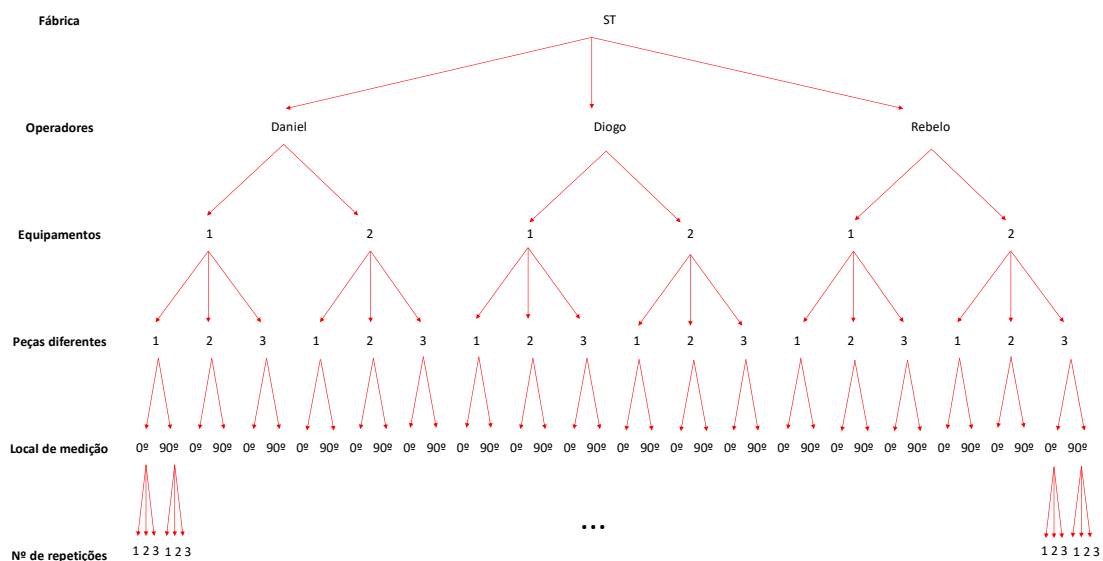


Figura 34 - Árvore de amostragem MSA diâmetro interno de carcaças

De seguida, após ter sido coletado um total de 108 amostras (Anexo 7.2.1) procedeu-se à validação dos seguintes atributos do sistema de medição com recurso ao *software* estatístico JMP:

Estabilidade

A análise de estabilidade pode ser feita através do gráfico de variabilidade e os principais desvios que representam a instabilidade do sistema de medição são as tendências e as causas especiais de medição. Uma vez que não se verificaram tendências crescentes ou decrescentes, nem mudanças de média, nem pontos muito acima ou muito abaixo dos pontos esperados (causas especiais), o sistema de medição encontrou-se estável. Assim, verificou-se que os equipamentos de medição conservaram as suas características metrológicas no decorrer do tempo.

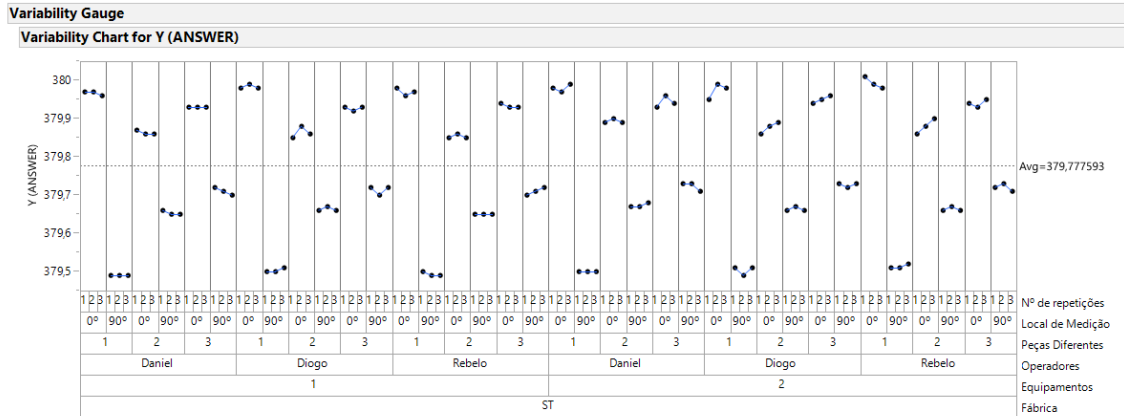


Figura 35 - Análise de estabilidade do sistema de medição de diâmetro interno de carcaças

Discriminação

Para se avaliar o atributo de discriminação foi utilizada como recurso a carta R do *software* estatístico. O equipamento de medição 1 apresentou 4 categorias de dados dentro dos limites da carta R, e como $4 \geq 4$ o equipamento 1 apresentou discriminação suficiente. O equipamento de medição 2 apresentou 5 categorias de dados dentro dos limites da carta R, e como $5 \geq 4$ o equipamento 2 apresentou discriminação suficiente.

Assim, verificou-se que os dois equipamentos de medição apresentaram capacidade de captar variações de medição.

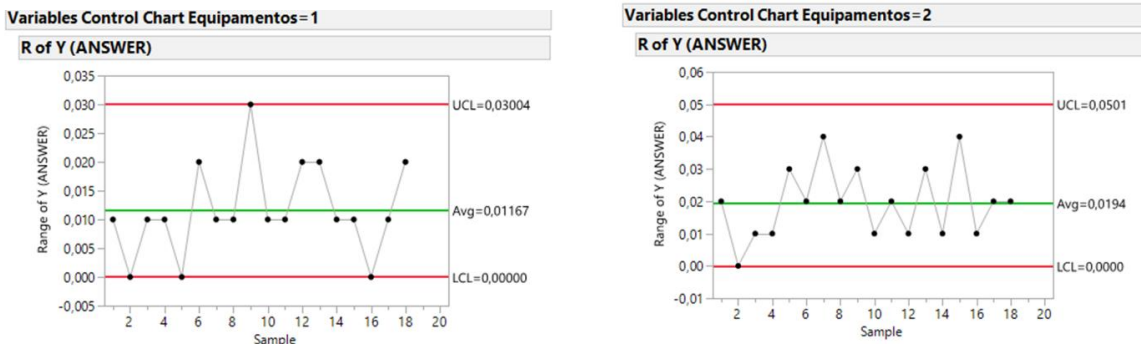


Figura 36 - Análise de discriminação do sistema de medição de diâmetro interno de carcaças

Reprodutibilidade

Como o sistema de medição analisado apresentou resultados consistentes, com médias semelhantes e variação das medidas dentro dos mesmos limites é possível constatar que o sistema de medição apresentou boa reprodutibilidade.

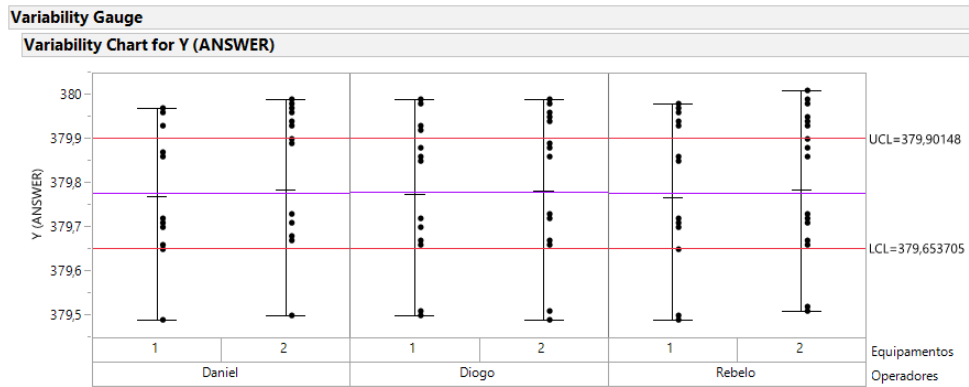


Figura 37 - Análise de reprodutibilidade do sistema de medição de diâmetro interno de carcaças

O cálculo de componentes de variação quantifica a análise de reprodutibilidade. Esta análise mostrou que mais de 80% da variação dos dados da amostra foi causada pela variação do local de medição.

Variance Components

Component	Var Component	% of Total	20 40 60 80	Sqrt(Var Comp)
Total	0,05113894	100,0		0,22614
Local de Medição	0,04319568	84,5		0,20784
Peças Diferentes*Local de Medição	0,00774357	15,1		0,08800
Equipamentos	0,00008313	0,1626		0,00912
Equipamentos*Operadores*Peças Diferentes*Local de Medição*Nº de repetições	0,00005767	0,1128		0,00759
Equipamentos*Operadores*Peças Diferentes	0,00002579	0,0504		0,00508
Operadores*Peças Diferentes*Local de Medição*Nº de repetições	0,00001076	0,021		0,00328
Operadores*Peças Diferentes*Nº de repetições	0,00000815	0,0159		0,00286
Equipamentos*Local de Medição*Nº de repetições	0,00000698	0,0136		0,00264
Equipamentos*Peças Diferentes*Local de Medição	0,00000361	0,0071		0,00190
Operadores*Local de Medição*Nº de repetições	0,00000299	0,0059		0,00173
Equipamentos*Peças Diferentes*Nº de repetições	0,00000060	0,0012		0,00078
Fábrica	0,00000000	0,0		0,00000

Figura 38 - Cálculo de componentes de variação do sistema de medição de diâmetro interno de carcaças

Assim, verificou-se concordância entre os resultados das medições obtidas realizadas em variadas condições de medição.

Repetibilidade

Verificou-se que a variação entre medidas foi menor que a variação entre as diferentes peças. Com isto, concluiu-se que o sistema de medição a ser analisado apresentou boa repetibilidade.

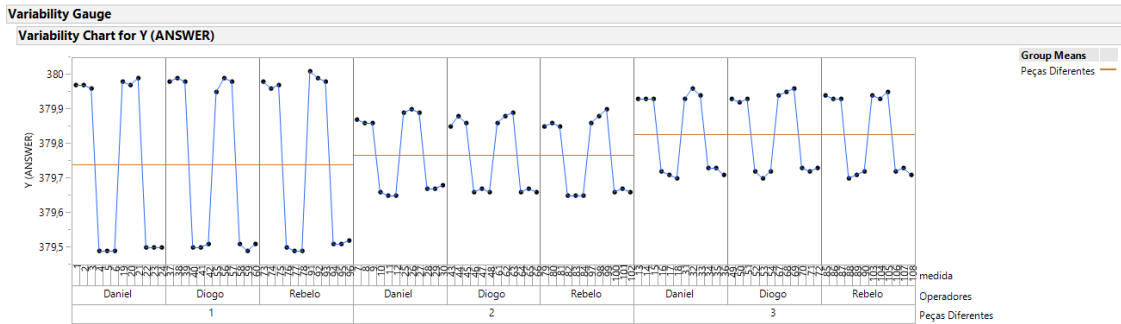


Figura 39 - Análise de repetibilidade do sistema de medição de diâmetro interno de carcaças

Exatidão

A exatidão do sistema de medição analisado é avaliada durante a calibração dos equipamentos de medição. Uma vez que os dois equipamentos de medição se encontravam calibrados na data da análise MSA constata-se que existiu concordância entre os resultados das amostras e os seus verdadeiros valores.

3.3.6.2 MSA – Diâmetro Externo de Estatores

A primeira etapa do desenvolvimento da análise MSA ao sistema de medição do diâmetro externo de estatores passou pela elaboração de uma árvore de amostragem que contempla 3 peças diferentes para análise, 3 operadores diferentes, 2 tipos de instrumentos de medição e 2 pontos a analisar em cada peça. Garantiram-se 3 medições no mesmo ponto.

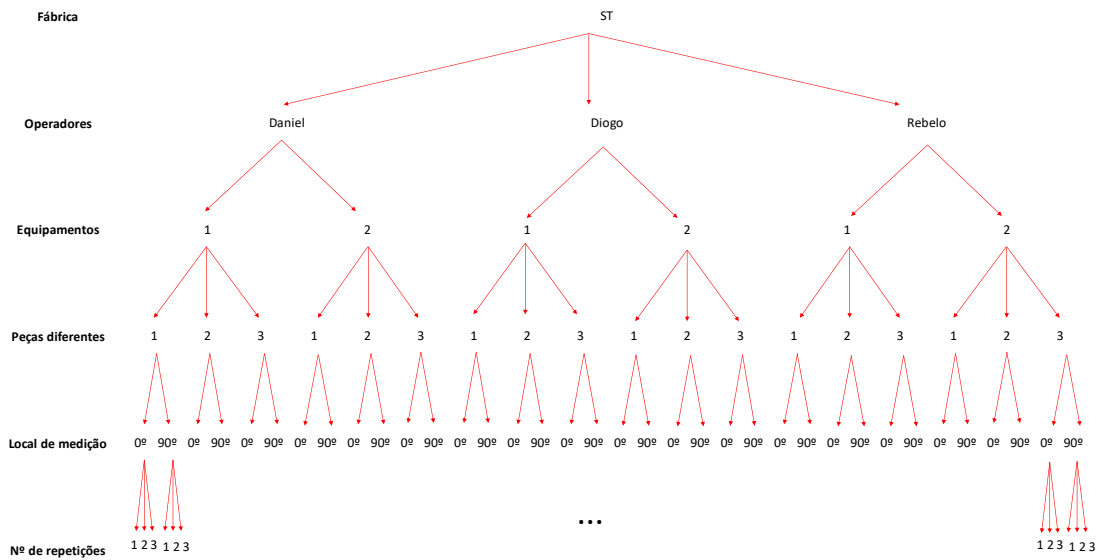


Figura 40 - Árvore de amostragem MSA diâmetro externo de estatores

De seguida, após terem sido coletadas 108 amostras (Anexo 7.2.2), procedeu-se à avaliação dos seguintes atributos do sistema de medição com recurso ao *software* estatístico JMP:

Estabilidade

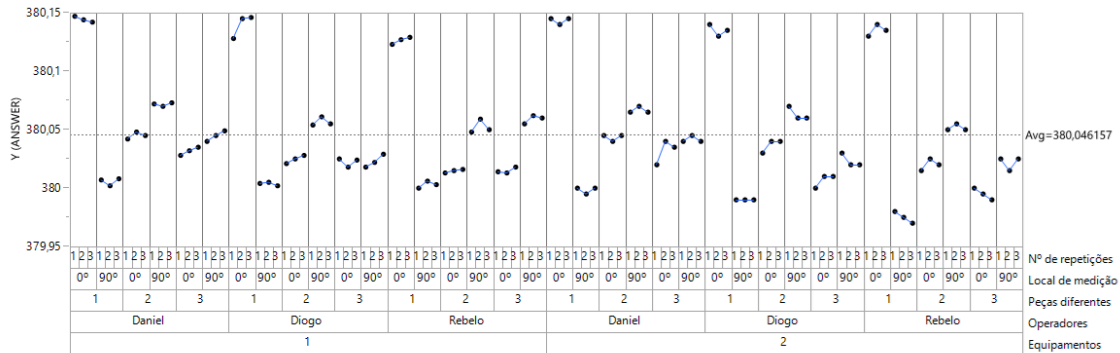


Figura 41 - Análise de estabilidade do sistema de medição de diâmetro externo de estatores

Uma vez que não se verificaram tendências crescentes ou decrescentes, nem mudanças de média, nem causas especiais, o sistema de medição encontrou-se estável. Assim, verificou-se que os equipamentos de medição conservaram as suas características metrológicas no decorrer do tempo.

Discriminação

Para se avaliar o atributo de discriminação foi utilizada como recurso a carta R do *software* estatístico. O equipamento de medição 1 apresentou 7 categorias de dados dentro dos limites da carta R, e como $7 \geq 4$ o equipamento 1 apresentou discriminação suficiente. O equipamento de medição 2 apresentou 4 categorias de dados dentro dos limites da carta R, e como $4 \geq 4$ o equipamento 2 apresentou discriminação suficiente.

Assim, verificou-se que os dois equipamentos de medição apresentaram capacidade de captar variações de medição.

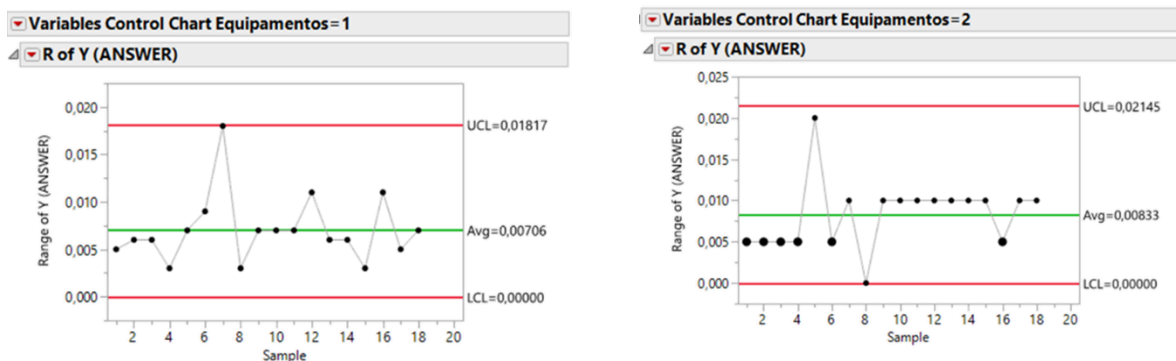


Figura 42 - Análise de discriminação do sistema de medição de diâmetro externo de estatores

Reprodutibilidade

Como o sistema de medição analisado apresentou resultados consistentes, com médias semelhantes e variação das medidas dentro dos mesmos limites foi possível constatar que o sistema de medição apresentou boa reprodutibilidade.

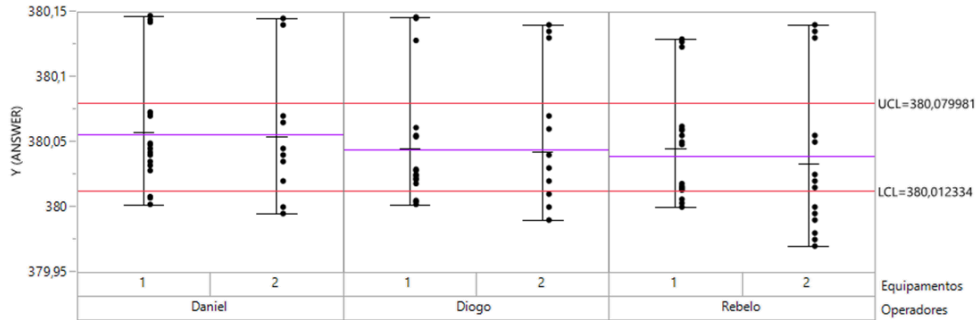


Figura 43 - Análise de reprodutibilidade do sistema de medição de diâmetro externo de estatores

A análise de cálculo de componentes de variação mostrou que mais de 90 % da variação dos dados da amostra é causada pelo componente Peças diferentes* Local de medição.

Variance Components				
Component	Var Component	% of Total	20 40 60 80	Sqrt(Var Comp)
Total	0,00261527	100,0		0,05114
Peças diferentes*Local de medição	0,00243088	92,9		0,04930
Operadores	0,00006026	2,3		0,00776
Equipamentos*Operadores*Peças diferentes*Local de medição	0,00002339	0,8944		0,00484
Equipamentos*Operadores*Peças diferentes	0,00002006	0,767		0,00448
Equipamentos*Operadores*Peças diferentes*Local de medição*Nº de repetições	0,00001837	0,7023		0,00429
Equipamentos*Peças diferentes	0,00001516	0,5798		0,00389
Equipamentos*Operadores*Local de medição	0,00001503	0,5749		0,00388
Operadores*Peças diferentes*Local de medição	0,00001315	0,5026		0,00363
Equipamentos*Peças diferentes*Local de medição	0,00000768	0,2938		0,00277
Equipamentos*Local de medição	0,00000406	0,1553		0,00202
Operadores*Local de medição	0,00000251	0,0961		0,00158
Equipamentos	0,00000190	0,0726		0,00138
Equipamentos*Local de medição*Nº de repetições	0,00000176	0,0673		0,00133
Operadores*Peças diferentes*Nº de repetições	0,00000052	0,0199		0,00072
Equipamentos*Nº de repetições	0,00000025	0,0095		0,00050
Local de medição*Nº de repetições	0,00000018	0,0071		0,00043
Nº de repetições	9,1537e-8	0,0035		0,00030
Fábrica	0,00000000	0,0		0,00000

Figura 44 - Cálculo de componentes de variação do sistema de medição de diâmetro externo de estatores

Assim, verificou-se concordância entre os resultados das medições obtidas realizadas em variadas condições de medição.

Repetibilidade

Verificou-se que a variação entre medidas foi menor que a variação entre as diferentes peças. Com isto, concluiu-se que o sistema de medição a ser analisado apresentou boa repetibilidade.

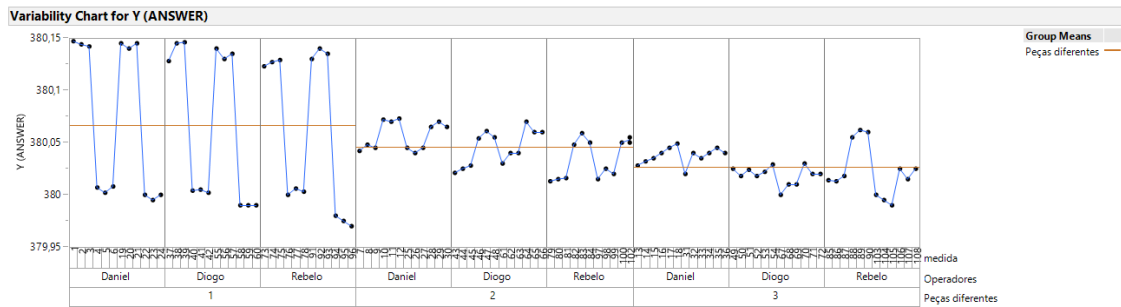


Figura 45 - Análise de repetibilidade do sistema de medição de diâmetro externo de estatores

Exatidão

A exatidão do sistema de medição analisado foi avaliada durante a calibração dos equipamentos de medição. Uma vez que os dois equipamentos de medição se encontravam calibrados na data da análise MSA constatou-se a existência de concordância entre os resultados das amostras e os seus verdadeiros valores.

3.3.6.3 MSA – Temperatura de Carcaças

A primeira etapa do desenvolvimento da análise MSA ao sistema de medição da temperatura de carcaças passou pela elaboração de uma árvore de amostragem que contempla 3 peças diferentes para análise, 2 operadores diferentes, 2 tipos de instrumentos de medição e 3 pontos a analisar em cada peça. Garantiu-se 1 medição no mesmo ponto.

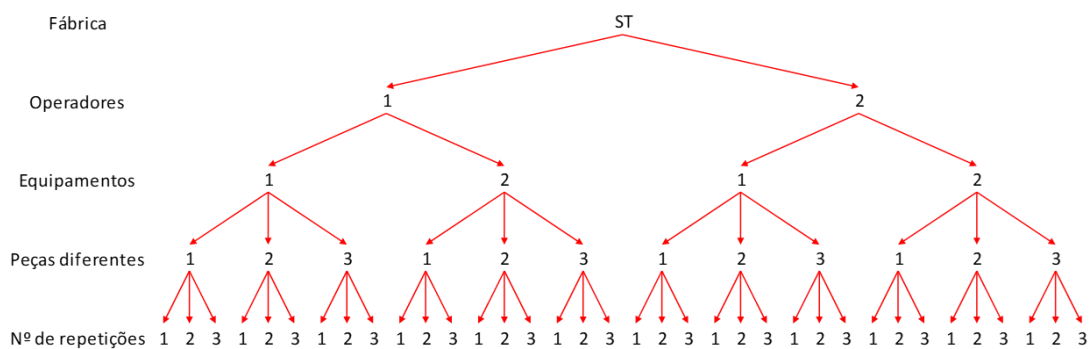


Figura 46 - Árvore de amostragem MSA temperatura de carcaças

De seguida, após terem sido coletadas 36 amostras (Anexo 7.2.3), procedeu-se à avaliação dos seguintes atributos do sistema de medição com recurso ao *software* estatístico JMP:

Estabilidade

Uma vez que não se verificaram tendências crescentes ou decrescentes, nem mudanças de média, nem causas especiais, o sistema de medição encontrou-se estável. Assim, verificou-se que os equipamentos de medição conservaram as suas características metroológicas no decorrer do tempo.

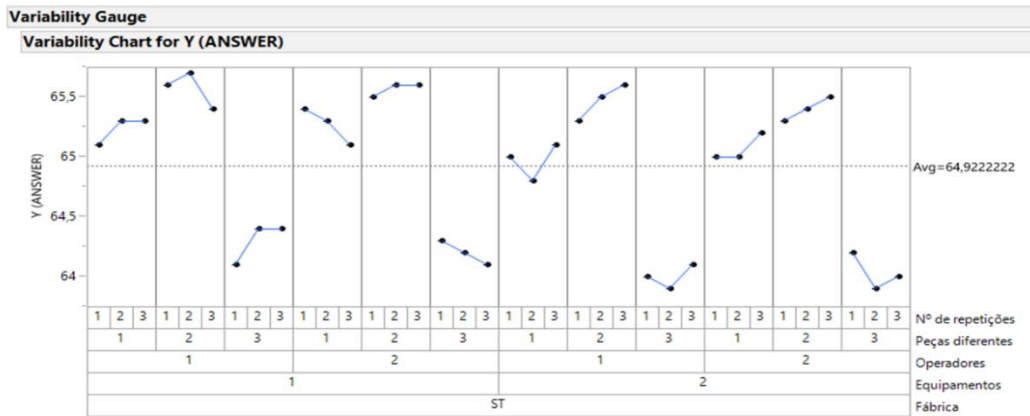


Figura 47 - Análise de estabilidade do sistema de medição de temperatura de carcaças

Discriminação

Para se avaliar o atributo de discriminação foi utilizada como recurso a carta R do software estatístico. O equipamento 1 apresentou 4 categorias de dados dentro dos limites da carta R, e como $4 \geq 4$ o equipamento 1 apresentou discriminação suficiente. O equipamento 2 apresentou 3 categorias de dados dentro dos limites da carta R. Verificou-se que este equipamento não conseguiu apresentar 4 categorias de dados ($3 < 4$), contudo, é importante referir que a escala de divisão mínima admissível para o procedimento de medição de temperatura de carcaças é da ordem dos graus e não das décimas de graus.

Assim, verificou-se que os dois equipamentos de medição apresentaram capacidade de captar variações de medição.

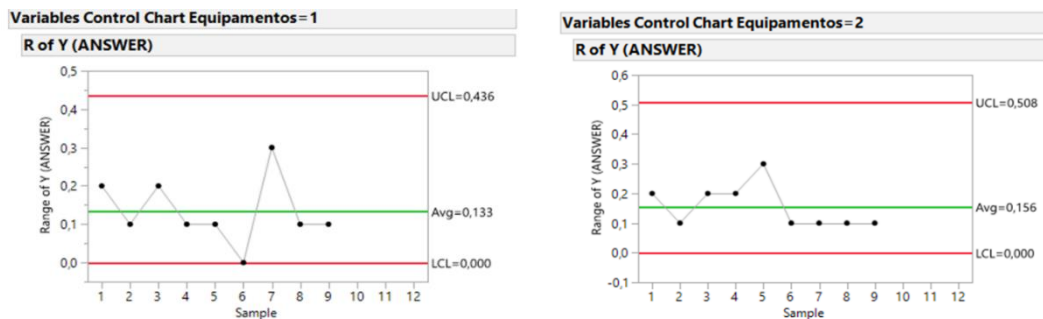


Figura 48 - Análise de discriminação do sistema de medição de temperatura de carcaças

Reprodutibilidade

Como o sistema de medição analisado apresentou resultados consistentes, com médias semelhantes e variação das medidas dentro dos mesmos limites foi possível constatar que o sistema de medição apresentou boa reprodutibilidade.

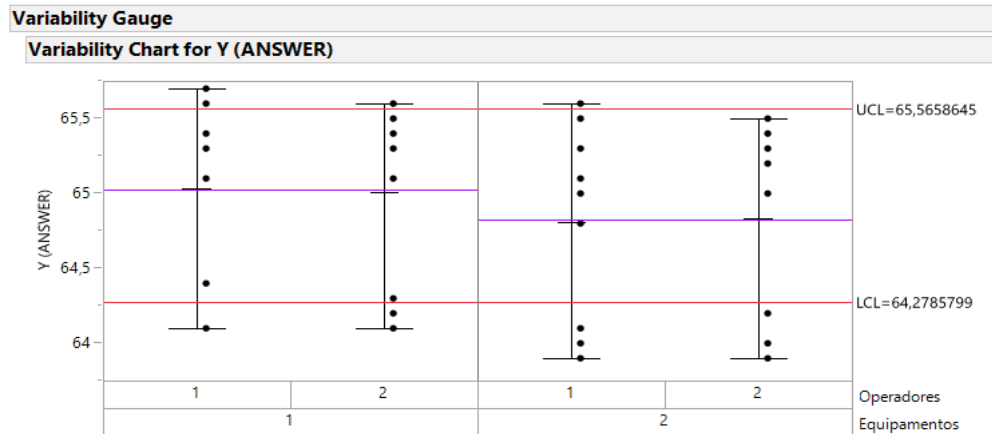


Figura 49 - Análise de reprodutibilidade do sistema de medição de temperatura de carcaças

A análise de cálculo de componentes de variação mostrou que mais de 89% da variação dos dados da amostra foi causada pelo componente Peças diferentes.

Variance Components				
Component	Var		Sqrt(Var Comp)	
	Component	% of Total	20	40
Total	0,24040040	100,0	0,49031	0,49031
Peças diferentes	0,21498680	89,4	0,46367	0,46367
Equipamentos	0,00964513	4,0	0,09821	0,09821
Equipamentos*Operadores*Peças diferentes*Nº de repetições	0,00575785	2,4	0,07588	0,07588
Equipamentos*Nº de repetições	0,00337666	1,4	0,05811	0,05811
Nº de repetições	0,00216858	0,9021	0,04657	0,04657
Operadores*Peças diferentes*Nº de repetições	0,00128890	0,5361	0,03590	0,03590
Equipamentos*Peças diferentes	0,00074321	0,3092	0,02726	0,02726
Operadores*Peças diferentes	0,00064431	0,268	0,02538	0,02538
Equipamentos*Peças diferentes*Nº de repetições	0,00054728	0,2277	0,02339	0,02339
Operadores	0,00046607	0,1939	0,02159	0,02159
Equipamentos*Operadores	0,00033587	0,1397	0,01833	0,01833
Operadores*Nº de repetições	0,00020187	0,084	0,01421	0,01421
Equipamentos*Operadores*Nº de repetições	0,00010154	0,0422	0,01008	0,01008
Peças diferentes*Nº de repetições	0,00007390	0,0307	0,00860	0,00860
Equipamentos*Operadores*Peças diferentes	0,00006243	0,026	0,00790	0,00790
Fábrica	0,00000000	0,0	0,00000	0,00000

Figura 50 - Cálculo de componentes de variação do sistema de medição de temperatura de carcaças

Assim, verificou-se a concordância entre os resultados das medições obtidas realizadas em variadas condições de medição.

Repetibilidade

Verificou-se que a variação entre medidas foi menor que a variação entre as diferentes peças. Com isto, concluiu-se que o sistema de medição a ser analisado apresentou boa repetibilidade.

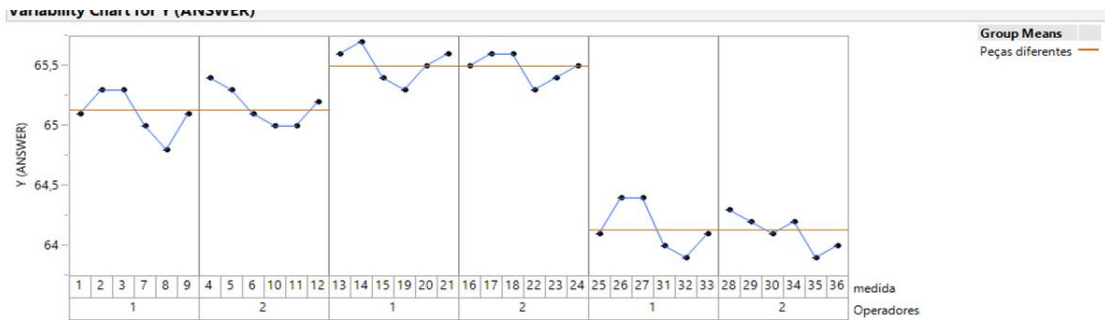


Figura 51 - Análise de repetibilidade do sistema de medição de temperatura de carcaças

Exatidão

A exatidão do sistema de medição analisado foi avaliada durante a calibração dos equipamentos de medição. Uma vez que os dois equipamentos de medição se encontravam calibrados na data da análise MSA constatou-se a concordância entre os resultados das amostras e os seus verdadeiros valores.

3.4 Fase Improve

Na fase *Improve* foram desenvolvidas e caracterizadas propostas de melhoria para as causas críticas identificadas na **secção 3.3.5**. As propostas de melhoria viáveis foram selecionadas para futura implementação.

Deste modo, foram propostas soluções. Uma das soluções de melhoria é relativa ao aquecimento prévio de carcaças – assim, será avaliada uma proposta de inserção a quente de estatores em carcaças de motores elétricos.

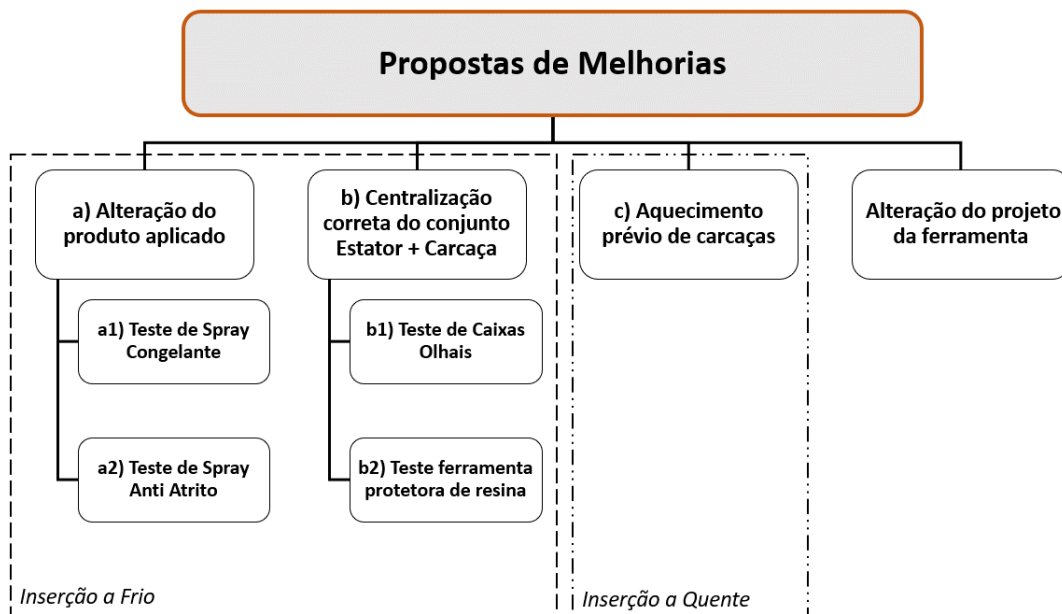


Figura 52 - Propostas de melhorias - Fase *Improve*

3.4.1 a) Alteração do produto aplicado

Nas condições *standard* de operação, é aplicado um produto lubrificante no estator com o intuito de redução do atrito existente entre as duas superfícies deslizantes – estator e carcaça – durante a introdução auxiliada por uma prensa hidráulica. A proposta de melhoria desenvolve-se no estudo de outros produtos alternativos que possam ter um impacto significativo na redução do coeficiente de atrito. Foram desenvolvidas e estudadas duas propostas distintas: a utilização de spray congelante e a utilização de spray anti atrito.

3.4.1.1 a1) Teste de Spray Congelante

Foi proposta a sugestão de melhoria de utilização de um spray congelante. O objetivo desta proposta foi a aplicação de spray na superfície lateral do estator. Deste modo, foi esperado que com o arrefecimento, o material do estator encolhesse de tal modo a que o aperto entre o estator e a carcaça fosse anulado.

Teoria:

- Com o arrefecimento do estator é esperada a anulação do aperto existente entre o estator e a carcaça (efeito de temperatura);

Efeitos Esperados:

- ⊖ Diminuição do coeficiente de atrito;
- ⊖ Levando à diminuição da P trabalho da prensa;
- ⊖ Aumentando a vida útil da ferramenta.

Em primeiro lugar, calculou-se o quanto é que o material do estator deveria encolher a fim de a situação de aperto se anular. Deste modo, analisaram-se as dimensões teóricas do estator e da carcaça. O aperto foi calculado segundo a equação (14):


$$\text{Aperto} = \text{Cota máxima estator} - \text{Cota mínima carcaça} \quad (14)$$

Tabela 10 - Dimensões teóricas do estator e carcaça

	Cota Mínima (mm)	Cota Máxima (mm)	Aperto (mm)
ESTATOR (Diâmetro)	380,004	380,040	0,240
CARCAÇA (Diâmetro interior)	379,800	379,900	

Realizou-se, então, um teste com o spray congelante ROST-OFF BLUE ICE da Würth. A tabela 11 apresenta algumas características do spray utilizado no teste.

Tabela 11 - Características do spray congelante

	Características	Massa Líquida (g)
	Produto utilizado para soltar ligações roscadas através do arrefecimento do material.	297,2

De seguida, procedeu-se à aplicação de 13g do produto em volta do estator mediu-se a diminuição de cota (mm) em seis pontos da superfície lateral do estator.

Tabela 12 - Diminuição de cota - utilizando spray congelante

Ponto	1	2	3	4	5	6
Δ – Diminuição de cota (mm)	0,000	0,010	0,000	0,010	0,000	0,000

Verificou-se que após serem aplicadas 13g de produto na superfície do estator, correspondendo a 4,4% da massa líquida do spray, o objetivo de diminuição de 0,240 mm não foi conseguido. Desta maneira, verificou-se que a diminuição de cota nos seis pontos não foi homogénea e continuou a existir aperto entre o estator e a carcaça.

Foi então possível concluir que o produto congelante não revelou capacidade suficiente para anular o aperto existente entre o estator e a carcaça. Desta maneira, verifica-se que a utilização de um spray congelante não é uma proposta de melhoria viável.

3.4.1.2 a2) Teste de spray anti atrito - Análise Design of Experiments

A outra proposta desenvolvida e estudada foi a utilização de um spray anti atrito. Após ter sido realizada uma análise *benchmarking* identificaram-se dois sprays anti atrito com lubrificantes sólidos.

Teoria:

- Com a utilização de spray anti atrito é esperada uma diminuição do coeficiente de atrito;




Efeitos Esperados:

- ⌚ Diminuição do coeficiente de atrito;
- ⌚ Levando à diminuição da P trabalho da prensa;
- ⌚ Aumentando a vida útil da ferramenta.

Estudou-se o impacto da alteração do produto aplicado durante o processo de introdução de estatores em carcaças através da análise *Design of Experiments* (DOE). A análise DOE permitiu estudar o impacto da variação do coeficiente de atrito causado pela aplicação de vários produtos redutores de atrito em diversas posições.

Por conseguinte, foram estudados 3 tipos de produtos lubrificantes: vaselina, FUCHS G300 e FUCHS G900.

Tabela 13 - Características dos 3 tipos de produtos utilizados na análise DOE

Tipo de Produto	Características	Massa Líquida (g)
 Vaselina	Produto aplicado nas condições <i>standard</i> de operação em chão de fábrica. Permite a lubrificação de longa duração de componentes sujeitos a elevadas pressões.	4 000
 FUCHS G300	Spray seco que contém grafite na sua composição e possui solventes voláteis que permitem uma secagem rápida à superfície do metal, deixando um filme seco, duradouro e uniforme com proteção anti atrito.	365
 FUCHS G900	Lubrificante de película sólida resultante da combinação de lubrificantes sólidos com uma proporção predominante de Bissulfureto de Molibdénio. Após o seu endurecimento à temperatura ambiente, forma-se uma película lubrificante seca e muito aderente a vários materiais.	397

Vale a pena salientar que a fim de se poder validar a utilização dos dois produtos da FUCHS na análise DOE foi necessário proceder a um ensaio prévio em laboratório. Deste modo, foram testados dois motores em laboratório – em cada motor foi aplicado um produto diferente. Da análise realizada, verificou-se que os binários dos motores não foram comprometidos. Não ocorreram deslizamentos do estator e não se verificaram danos nos componentes dos motores. O rendimento dos motores permaneceu em valores normais e não se verificaram interferências na dissipação térmica do motor. Desta forma, foi possível prosseguir a análise DOE.

Para além do estudo do tipo de produto utilizado, estudou-se também a influência da posição de aplicação do produto lubrificante no estator. Assim, estudaram-se três posições diferentes de aplicação de lubrificante, representadas na figura 53:

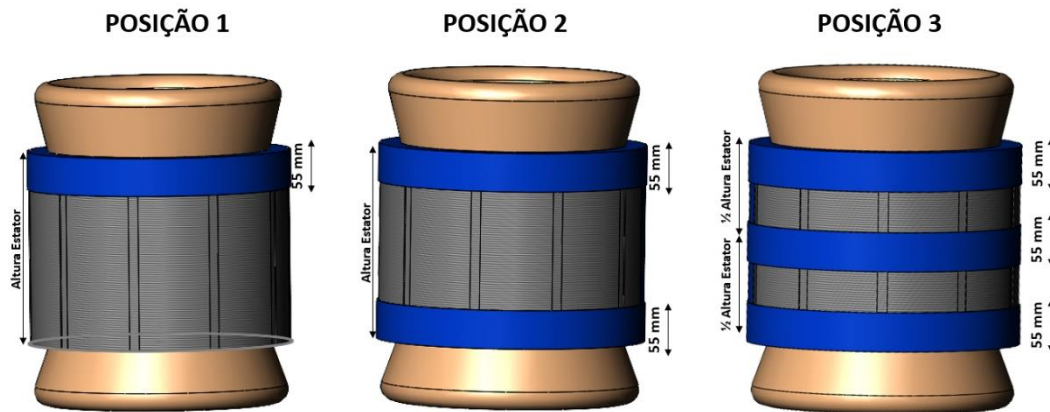


Figura 53 - Posição de aplicação de produto - análise DOE

O modelo de experiências adotado contemplou o estudo de 3 produtos diferentes (vaselina, FUCHS G300, FUCHS G900) aplicados em três posições diferentes (posição 1, posição 2 e posição 3).

Deste modo, foi realizada uma análise *Full Factorial* cujo modelo de experiências contempla o estudo de 2 fatores: Tipo de Produto e Posição. Cada fator é composto por três níveis.

Tabela 14 - Fatores e níveis da análise *Full Factorial*

Fator	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Tipo de Produto	Vaselina	FUCHS G300	FUCHS G900
Posição	Posição 1	Posição 2	Posição 3

O cálculo do número de testes a realizar foi baseado na equação (3):

$$N^{\circ} \text{ testes Full Factorial} = 3^2 = 9 \text{ testes} \quad (15)$$

Um dos testes compreendeu a replicação da situação *standard* utilizada em chão de fábrica: aplicação do produto vaselina na posição 1.

Como se admitiu repetibilidade na análise DOE repetiu-se duas vezes o mesmo teste. Assim, foram realizadas 18 experiências no total. A figura 54 apresenta a árvore de amostragem com a estratégia necessária à recolha de dados:

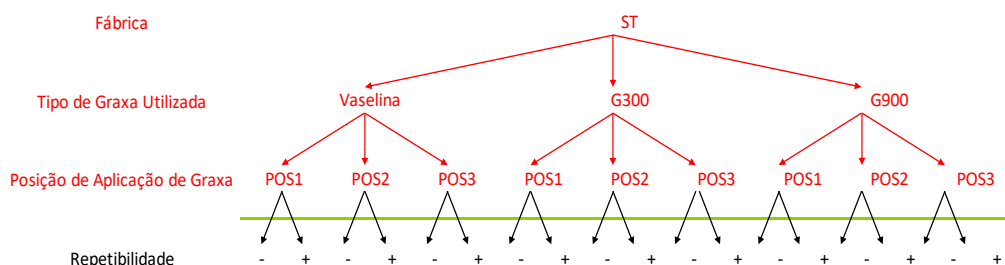


Figura 54 - Árvore de amostragem da análise DOE

De seguida procedeu-se à recolha de dados das 18 experiências. Assim, em cada amostra, recolheu-se o valor da pressão máxima atingida pela prensa hidráulica e mediram-se o diâmetro interno da carcaça e o diâmetro externo do estator com equipamentos cuja validação ocorreu na análise MSA. A massa de produto utilizada foi monitorizada. Utilizou-se a base cálculo presente na **secção 3.3.2** para se determinar o valor do coeficiente de atrito (μ). A tabela 16 apresenta os principais valores utilizados no cálculo do coeficiente de atrito (μ). Os restantes dados utilizados na base de cálculo encontram-se representados no Anexo 7.3.

Tabela 15 - Dados utilizados no cálculo do coeficiente de atrito - análise DOE

Nº Expe r.	Tipo de Produto	Posição	Quantidade Utilizada (kg)	A lateral (mm^2)	P conta cto (MPa)	FA (N)	μ
#1	Vaselina	1	0,003	334307,975	9,198	482025,700	0,157
#2	Vaselina	1	0,003	358152,558	5,891	443952,800	0,210
#3	Vaselina	2	0,003	250730,981	3,532	409687,200	0,463
#4	Vaselina	2	0,003	250759,569	6,041	409687,200	0,270
#5	Vaselina	3	0,008	250749,673	7,684	421109,100	0,219
#6	Vaselina	3	0,008	358155,700	7,936	409687,200	0,144
#7	FUCHS G300	1	0,011	417908,792	6,737	535327,700	0,190
#8	FUCHS G300	1	0,016	322347,198	6,104	459182,000	0,233
#9	FUCHS G300	2	0,027	322331,647	2,898	436338,200	0,467
#10	FUCHS G300	2	0,032	322337,302	6,364	459182,000	0,224
#11	FUCHS G300	3	0,035	322318,924	5,664	447760,100	0,245
#12	FUCHS G300	3	0,040	322328,820	6,958	428723,700	0,191
#13	FUCHS G900	1	0,018	358147,846	3,137	409687,200	0,365
#14	FUCHS G900	1	0,016	334299,178	5,020	413494,500	0,246
#15	FUCHS G900	2	0,010	429764,220	5,774	443952,800	0,179
#16	FUCHS G900	2	0,018	334313,839	6,165	424916,400	0,206
#17	FUCHS G900	3	0,025	334321,169	6,240	421109,100	0,202
#18	FUCHS G900	3	0,032	334322,635	6,853	421109,100	0,184

A análise DOE utilizada compreendeu três fases:

- 1º) Análise;
- 2º) Metodologia de Superfície de Resposta;
- 3º) Validação do Modelo Experimental.

A técnica DOE foi realizada com auxílio ao *software* estatístico JMP.

1º) Fase Análise

A fase de análise compreendeu duas análises: análise prática e análise gráfica.

- Análise Prática:

Na análise prática estudou-se a existência de causas especiais e variação nos dados coletados e estabeleceu-se a meta da análise DOE.

Em primeiro lugar estabeleceu-se a meta do estudo DOE. Uma vez que a resposta do estudo a ser analisada é o coeficiente de atrito (μ), o objetivo é do tipo: quanto menor o valor de μ , melhor.

De seguida, recorreu-se ao gráfico *Overlay Plot* do *software* JMP e verificou-se a ausência de casos especiais. Verificou-se também que a experiência gerou variação suficiente.

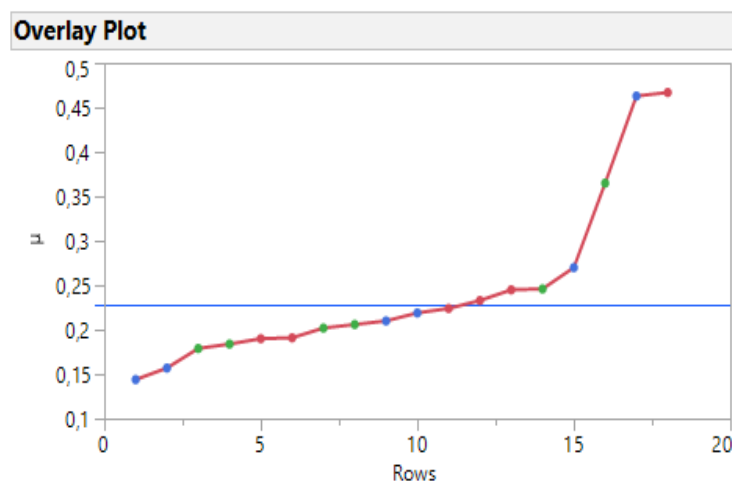


Figura 55 - Gráfico *Overlay Plot* – Análise Prática

- Análise Gráfica:

Na análise gráfica estudou-se quais os fatores e/ou interações com maior efeito na variável resposta analisada – coeficiente de atrito (μ). Assim, foi possível verificar quais desses fatores são estatisticamente significativos. Um fator diz-se estatisticamente

significativo quando existe uma maior probabilidade do resultado analisado ser afetado pela mudança de nível desse fator.

Recorreu-se à análise de dois gráficos: *Regression Plot* e *Scaled Estimates*, ambos provenientes do software JMP.

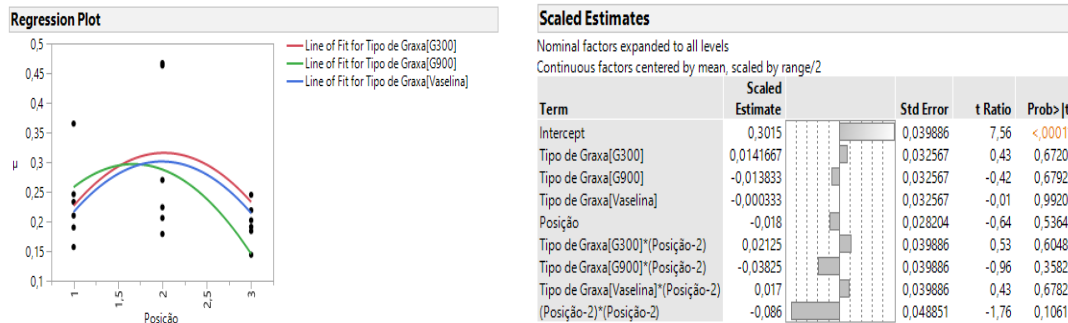


Figura 56 - Gráfico *Regression Plot* e *Scaled Estimates* - Análise Gráfica

O gráfico *Regression Plot* atribuiu uma regressão para cada tipo de produto analisado. Assim, cada regressão apresenta valores do coeficiente de atrito em função da posição de aplicação. Analisando o gráfico foi possível verificar que o valor mais baixo de coeficiente de atrito é relativo à utilização do produto FUCHS G900 na posição 3.

Para verificar a significância estatística dos parâmetros analisados, analisou-se o critério (Prob>|t|) presente no gráfico *Scaled Estimates*. Este critério representa o quão estatisticamente significativo é um determinado fator. O software JMP considera como linha de corte o valor (Prob>|t|) = 0,20, ou seja, o valor de um fator significativo deve ser inferior a 0,2.

Como não existe nenhum fator com valor (Prob>|t|) < 0,20 verifica-se que nenhum fator se mostrou estatisticamente significativo. Como o valor de (Prob>|t|) do fator “posição” foi inferior dos valores relativos ao tipo de produto utilizado, verificou-se que a posição de aplicação do produto foi estatisticamente mais significativa do que o tipo de produto utilizado.

Apesar de nenhum fator ter tido um valor de (Prob>|t|) < 0,20 decidiu-se prosseguir com a análise DOE.

2ª) Fase Metodologia de Superfície de Resposta

A segunda fase da análise DOE é o estabelecimento do espaço ótimo de resposta. Para determinar qual a combinação ótima de fatores recorreu-se ao gráfico *Prediction Profiler*. De acordo com a análise do gráfico verificou-se que a combinação associada a uma resposta ótima – menor coeficiente de atrito (μ) – é composta pela combinação do produto FUCHS G900 na posição 3. Importa salientar que a previsão não foi

suficientemente robusta devido ao facto de nenhum parâmetro ter estado associado a um valor de $(\text{Prob}>|t|) < 0,20$.

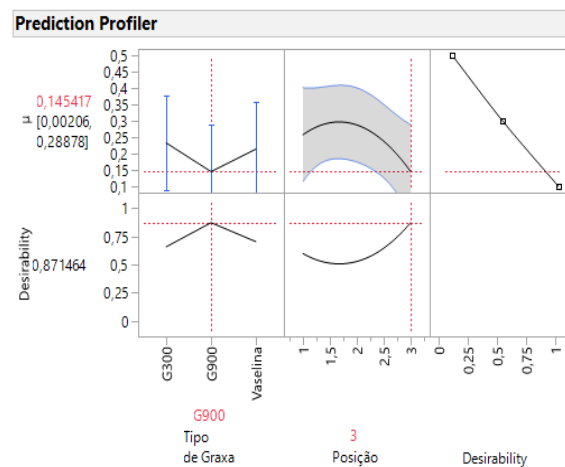


Figura 57 - Gráfico *Prediction Profiler* - Fase metodologia de superfície de resposta

De seguida procedeu-se à análise de variabilidade. Para isso, analisaram-se dois gráficos *Variability Chart* provenientes do *software* JMP.

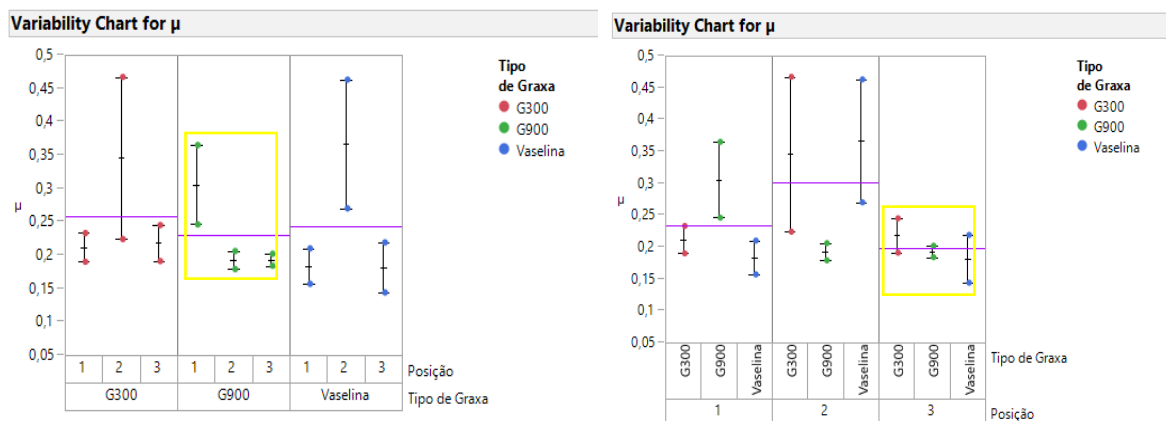


Figura 58 - Gráficos *Variability Chart* - Fase metodologia de superfície de resposta

No primeiro gráfico foi possível analisar a variabilidade de cada tipo de produto. Verificou-se que o valor médio mais baixo de μ correspondeu à utilização do produto FUCHS G900. Adicionalmente, os dados relativos a este produto são os que apresentaram uma menor variabilidade.

No segundo gráfico foi possível analisar a variabilidade de cada tipo de posição. Verificou-se que o valor médio mais baixo de μ correspondeu à aplicação de produto na posição 3. Adicionalmente, foi possível também concluir que os dados relativos a esta posição foram os que apresentaram uma menor variabilidade.

3ª) Fase de Validação do Modelo Experimental

A última fase da análise DOE é composta pela validação do modelo ótimo de precisão. Na fase anterior determinou-se a combinação de fatores associada a uma resposta ótima – produto FUCHS G900 na posição 3. A fim de se validar esta previsão, testaram-se 3 amostras nas condições mencionadas. A tabela 17 apresenta os principais valores utilizados no cálculo do coeficiente de atrito (μ). Os restantes dados utilizados na base de cálculo encontram-se representados no Anexo 7.4.

Tabela 16 - Dados validação DOE

Nº Expe r.	Tipo de Produto	Posição	Quantidade produto utilizada (kg)	A lateral (mm^2)	P contacto (MPa)	FA (N)	μ
#1	FUCHS G900	Posição 3	0,042	334283, 051	2,847	428723, 700	0,45 0
#2	FUCHS G900	Posição 3	0,037	334285, 983	3,838	421109, 100	0,32 8
#3	FUCHS G900	Posição 3	0,030	334288, 916	5,288	421109, 100	0,23 8

Os dados recolhidos foram incluídos num gráfico *Variability Chart* do *software* JMP. Verificou-se que as três amostras apresentaram um valor de coeficiente de atrito superior ao valor de referência experimental - $\mu = 0,227$ - calculado na **secção 3.3.3**.

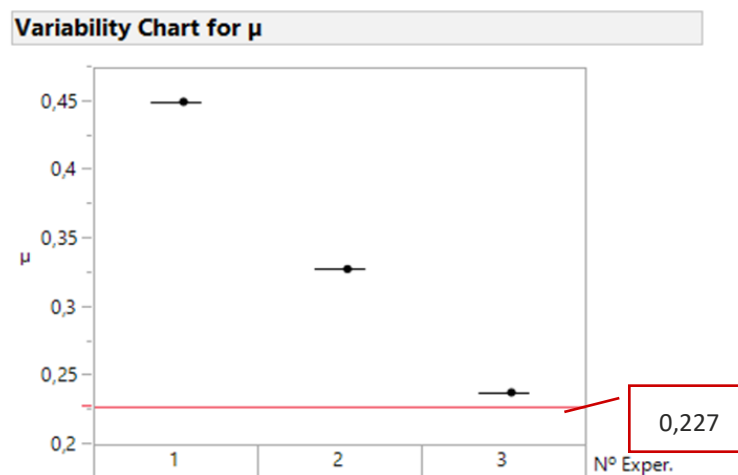


Figura 59 - Gráfico *Variability Chart* - validação do modelo experimental

Analisando o gráfico, observou-se que os dados não apresentaram estabilidade.

Pôde então constatar-se que os fatores não apresentaram elevada significância estatística. Assim, não foi possível validar esta solução. Da análise DOE pôde concluir-se

que não é provável que a alteração do produto e respetiva posição de aplicação tenham um impacto significativo na resposta analisada – coeficiente de atrito. Assim, devem ser estudadas outras soluções a fim de diminuir o coeficiente de atrito existente durante a montagem do estator na carcaça do motor elétrico.

Vale a pena referir que a quantidade de amostras analisada na fase de validação do modelo experimental foi muito reduzida (3 amostras), a fim de ser possível proceder-se a uma análise completa deveriam ter sido analisadas, pelo menos, 30 amostras, contudo, não existiu disponibilidade para tal.

3.4.2 b) Centralização correta do conjunto Estator + Carcaça

Uma das causas críticas identificadas do coeficiente de atrito elevado foi a descentralização do estator e da carcaça durante o processo de inserção de estatores em carcaças de motores elétricos. Deste modo, foram propostas e testadas duas ações de melhoria para combate do problema identificado: utilização de caixas de olhais e implementação de ferramenta de proteção de resina no estator.



3.4.2.1 b1) Teste de caixas de olhais

Foi proposta a ação de melhoria de utilização de um bloco nos olhais que permitem o transporte da carcaça até ao estator. Verificou-se que, em condições *standard* de operação, os olhais não eram frequentemente aparafusados na totalidade.



Figura 60 - Função dos olhais - auxílio no transporte da carcaça

Tabela 17 - Propostas de melhoria - blocos para olhais

Condições standard de operação	Proposta de melhoria: Blocos Olhais
	

Os olhais, a não serem aparafusados na totalidade, não conseguiram garantir a total estabilidade da carcaça durante o seu suporte no estator. Deste modo, verificou-se que nas condições *standard* de operação a carcaça era posicionada inclinada no estator. Por consequência, forças tangenciais poderiam ter sido criadas devido ao deslizamento inclinado e descentralizado da carcaça sobre o estator. Deste modo, as forças tangenciais criadas pela inclinação da carcaça poderiam ser responsáveis pelo aumento do coeficiente de atrito.



Figura 61 - Posicionamento da carcaça no estator

Teoria:

- Com a utilização de bloco nos olhais é esperada a diminuição do coeficiente de atrito através do posicionamento centralizado e alinhado da carcaça sobre o estator;

Efeitos Esperados:

- ↳ Carcaça alinha e centralizada;
- ↳ Diminuição do coeficiente de atrito;
- ↳ Levando à diminuição da P trabalho da prensa;
- ↳ Aumentando a vida útil da ferramenta.

Deste modo, testaram-se 3 introduções em condições *standard* de operação (sem bloco para olhais) e 3 introduções com a proposta de melhoria de caixas nos olhais. A figura 62 apresenta a árvore de amostragem com a estratégia necessária à recolha de dados.

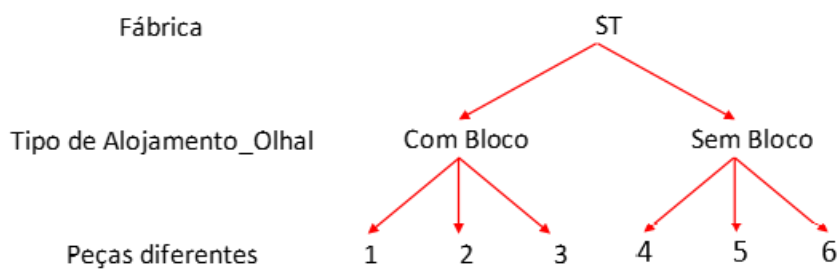


Figura 62 - Árvore de amostragem da análise aos blocos de olhais

De seguida procedeu-se à recolha de dados das 6 experiências. Em cada amostra, recolheu-se o valor da pressão máxima atingida pela prensa hidráulica e mediram-se o diâmetro interno da carcaça e o diâmetro externo do estator com equipamentos cuja validação ocorreu na análise MSA. Utilizou-se a base cálculo presente na **secção 3.3.2** para se determinar o valor do coeficiente de atrito (μ). A tabela 19 apresenta os principais valores utilizados no cálculo do coeficiente de atrito (μ). Os restantes dados utilizados na base de cálculo encontram-se representados no Anexo 7.5.

Tabela 18 - Dados utilizados no cálculo do coeficiente de atrito - análise bloco para olhais

Nº Exper.	Situação	A lateral (mm^2)	P contacto (MPa)	FA (N)	μ	μ médio
# 1	Sem bloco	334337,296	7,540	447760,103	0,178	
#2	Sem bloco	334338,762	8,192	436338,240	0,159	0,194
#3	Sem bloco	334310,907	5,439	443952,815	0,244	

#4	Com bloco	334324,101	5,666	440145,528	0,232	
#5	Com bloco	334319,703	6,700	451567,391	0,202	0,209
#6	Com bloco	334307,975	6,549	424916,377	0,194	

Os dados recolhidos foram incluídos num gráfico *Variability Chart* do *software JMP*. Verificou-se que as três amostras apresentaram um valor de coeficiente de atrito superior ao valor de referência- $\mu = 0,227$ - calculado na **secção 3.3.3**.

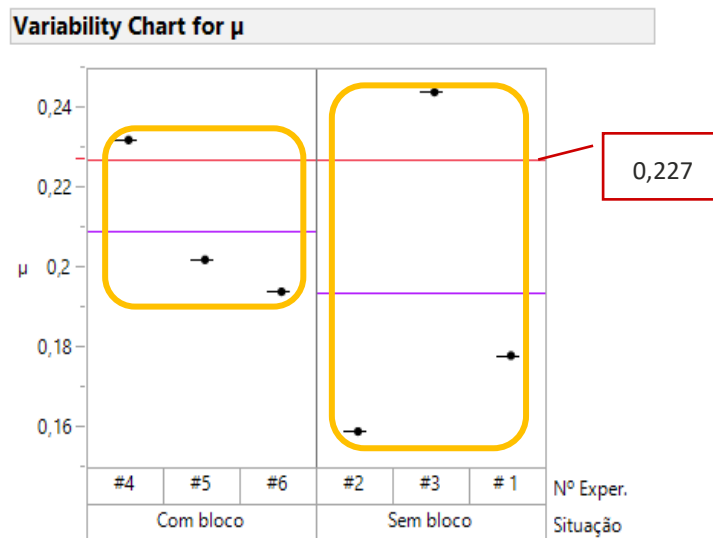


Figura 63 - Gráfico Variability Chart - - Teste de Caixa de Olhais

Analisando o gráfico, observou-se que os dados não apresentaram estabilidade. Como o valor médio do coeficiente de atrito na situação com bloco (0,209) foi superior ao valor médio do coeficiente de atrito na situação sem bloco (0,194), a proposta de melhoria de utilização de blocos nos olhais não pôde ser validada.

3.4.2.2 b2) Teste de ferramenta protetora de resina

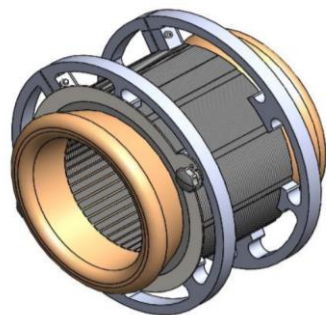
Foi proposta a ação de melhoria de implementação de uma ferramenta protetora de resina. Verificou-se que, em condições *standard* de operação, a zona de contacto entre o estator e a ferramenta estava com acumulação de resina. A resina acumulada na superfície da ferramenta foi responsável pelo desalinhamento do estator. Deste modo, verificou-se que o desalinhamento do estator foi uma possível causa da criação de forças tangenciais devido ao deslizamento inclinado da carcaça sobre o estator. As forças tangenciais geradas pela inclinação do estator foram uma potencial causa do aumento do coeficiente de atrito.



Figura 64 - Problema de resina acumulada na superfície de contacto entre o estator e a ferramenta

A fim de combater este problema, concebeu-se uma ferramenta protetora de resina para ser utilizada durante a atividade de impregnação de resina. Deste modo, foi esperado que o batente concebido protegesse a zona de contacto entre o estator e a ferramenta de inserção de estatores. Foi então desenvolvida uma ferramenta protetora de resina cujos desenhos se encontram no Anexo 7.6 e cujas características podem ser consultadas na tabela 20:

Tabela 19 - Características da ferramenta protetora de resina



Material	St-52
----------	-------

Massa (kg) (Cada Ferramenta)	1,028
---------------------------------	-------

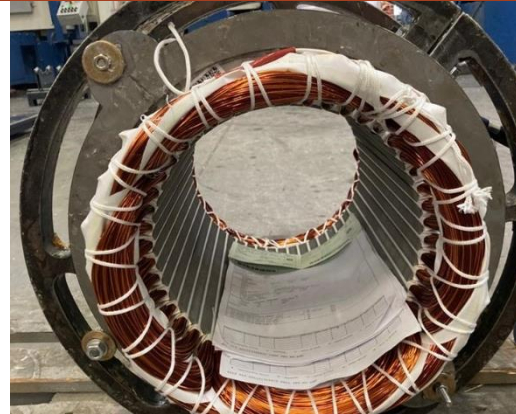
A conceção da ferramenta protetora foi justificada pela necessidade da uniformização da área de contacto entre o estator e a ferramenta de inserção de estatores e pela garantia de alinhamento entre o estator e a ferramenta de inserção de estatores. A tabela 20 apresenta a comparação entre as condições *standard* de operação e a proposta de melhoria.

Tabela 20 - Proposta de melhoria - ferramenta protetora de resina

Condições standard de operação



Proposta de melhoria: Ferramenta protetora de resina

**Teoria:**

- Com a utilização da ferramenta protetora de resina é esperada a uniformização da área de contacto entre o estator e a ferramenta de inserção e o alinhamento do estator e da ferramenta de inserção;

Efeitos Esperados:

- ⌚ Estator alinhado e centralizado;
- ⌚ Diminuição do coeficiente de atrito;
- ⌚ Levando à diminuição da P trabalho da prensa;
- ⌚ Aumentando a vida útil da ferramenta.

Por conseguinte, foi elaborada a árvore de amostragem com a estratégia necessária à recolha de dados. Deste modo, a árvore de amostragem representada na figura 65 contempla a recolha de 3 amostras em condições *standard* de operação (Sem Aro) e de 3 amostras com a proposta de melhoria (Com Aro).

De seguida procedeu-se à recolha de dados das 6 amostras. Em cada amostra, recolheu-se o valor da pressão máxima atingida pela prensa hidráulica e mediram-se o diâmetro interno da carcaça e o diâmetro externo do estator com equipamentos cuja validação ocorreu na análise MSA. Utilizou-se a base cálculo presente na **secção 3.3.2** para se determinar o valor do coeficiente de atrito (μ). A tabela 22 apresenta os principais valores utilizados no cálculo do coeficiente de atrito (μ). Os restantes dados utilizados na base de cálculo encontram-se representados no Anexo 7.7.

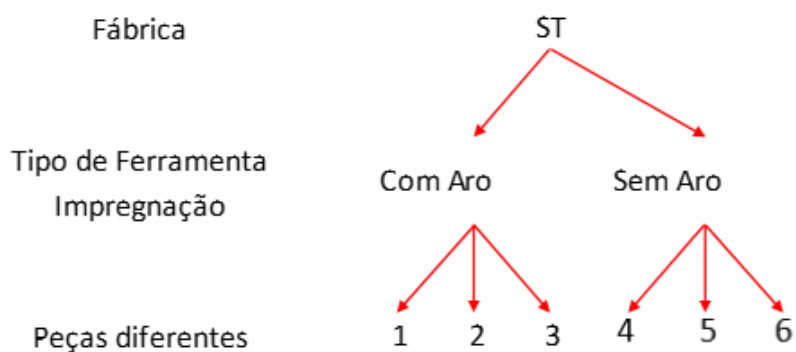


Figura 65 - Árvore de amostragem da análise à ferramenta protetora de resina

Tabela 21 - Dados utilizados no cálculo do coeficiente de atrito - análise ferramenta protetora de resina

Nº Exper.	Situação	A lateral (mm ²)	P contacto (MPa)	FA (N)	μ
# 1	Com Aro	334310,907	6,242	424916,37 7	0,204
#2	Com Aro	298485,336	5,898	474411,11 7	0,269
#3	Com Aro	-	-	-	-
#4	Sem Aro	334337,296	7,540	447760,10 0	0,180
#5	Sem Aro	334338,762	8,192	436338,24 0	0,160
#6	Sem Aro	334310,907	5,439	443952,82 0	0,240

Os dados recolhidos foram incluídos num gráfico *Variability Chart* do *software JMP*. Verificou-se que as três amostras apresentaram um valor de coeficiente de atrito superior ao valor de referência - $\mu = 0,227$ - calculado na **secção 3.3.3**.

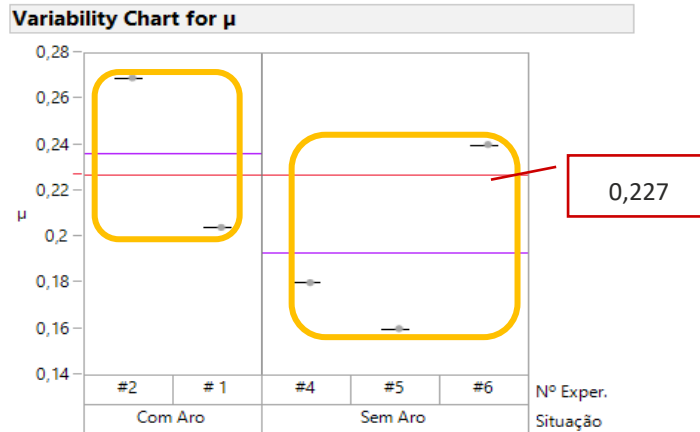


Figura 66 - Variability Chart - Teste de ferramenta protetora de resina

Verificou-se que a ferramenta protetora de resina sofreu empeno no final da utilização na primeira amostra. Durante a segunda amostra verificou-se a migração de resina para a superfície de contacto entre o estator e a ferramenta de inserção. Uma vez que a função de batente da ferramenta ficou comprometida e existiram empenos, não foi possível utilizar a ferramenta no teste da terceira amostra.



Figura 67 - Empeno da ferramenta protetora de resina

Uma vez que não foi possível testar a terceira amostra da utilização da ferramenta protetora de resina e a segunda amostra foi comprometida por migração de resina, não se reuniram condições para validar a proposta de melhoria.

3.4.3 c) Aquecimento prévio de carcaças

As condições *standard* de operação incluem a inserção a frio de estatores em carcaças de motores elétricos. No entanto, uma das propostas de melhoria é relativa ao aquecimento prévio de carcaças, ou seja, foi avaliada uma proposta de inserção a quente de estatores em carcaças de motores elétricos.

O principal objetivo foi conseguir determinar a temperatura a que a carcaça deveria ser aquecida para que o aperto existente entre os dois elementos acoplados - estator e carcaça - fosse anulado. Foi também pertinente determinar o tempo necessário de aquecimento de cada carcaça e proceder a uma estimativa de custo mensal de energia associado a este aquecimento.

Teoria:

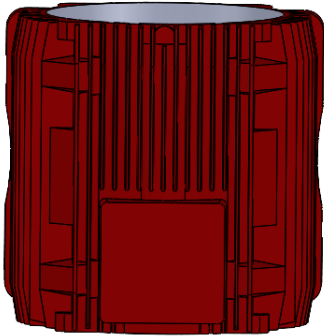
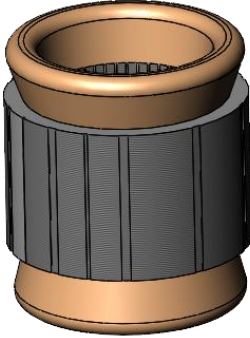
- Com o aquecimento prévio da carcaça é esperado que o aperto existente entre o estator e a carcaça seja anulado, provocando a anulação do valor do coeficiente de atrito ;

Efeitos Esperados:

- ↻ Anulação do coeficiente de atrito;
- ↻ Aumentando a vida útil da ferramenta.

Na base de cálculo elaborada, as dimensões consideradas para os dois elementos – estator e carcaça - foram as dimensões teóricas que estão associadas ao valor de aperto máximo. Estas dimensões estão representadas na tabela 23:

Tabela 22 - Dimensões consideradas na base de cálculo da proposta de aquecimento de carcaça

Carcaça	Estator
	
Diâmetro interno = 379,800 mm	Diâmetro externo = 380,040 mm
Diâmetro externo = 425,000 mm	
Altura = 510,000 mm	

Base de Cálculo de Aquecimento de Carcaças

1ª) Cálculo da temperatura de aquecimento

Utilizou-se a equação (4) para determinar a temperatura necessária que o material da carcaça (FC-200) devesse atingir para que o aperto existente entre o estator e a carcaça fosse anulado:

$$\frac{(L_f - L_0)}{L_0} = \alpha \times (T_f - T_0) \quad (4)$$

$$\frac{(380,040 - 379,800)}{379,800} = 0,000013 \times (T_f - 20) \quad (16)$$

Aonde:

L_0 = dimensão inicial do material (mm);

L_f = dimensão final do material (mm);

T_0 = temperatura inicial do material (temperatura ambiente no chão de fábrica) (°C);

T_f = temperatura final do material (°C);

α = coeficiente de expansão térmica material (FC-200) (Matmatch, n.d.) (°C⁻¹)

$$T_f = 68,61 \text{ °C} \quad (17)$$

A temperatura à qual o aperto se anula é de **68,61 °C**, contudo, foi necessário ter em consideração possíveis perdas de calor durante o transporte da carcaça desde a estufa até ao local de inserção. Por esse motivo, estabeleceu-se a **temperatura final de 100°C**.

Como o processo de transferência de calor retratado é condução transiente, recorreu-se ao método da capacidade concentrada para calcular o tempo necessário para o material da carcaça atingir os 100 °C.

2ª) Cálculo do número de Biot

O método da capacidade concentrada requer que se proceda ao cálculo do número de Biot., seguindo a equação (18):

$$Bi = \frac{h \times L_c}{k} \quad (18)$$

Aonde:

h = coeficiente de convecção total (W/(m².K));

Uma vez que a velocidade do vento presente no ambiente de transferência de calor é nula, considerou-se $h = 5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ segundo McAdams (McAdams & Transmission, 1954);

L_c = comprimento característico de 1 carcaça (m);

$$Lc = \frac{V}{As} \quad (19)$$

V = volume de 1 carcaça (m^3);

$$V = \pi x \left(\left(\frac{0,425}{2} \right)^2 - \left(\frac{0,380}{2} \right)^2 \right) x 0,510 \quad (20)$$

$$\text{Volume 1 carcaça} = 0,01451 m^3 \quad (21)$$

As = Área exposta de 1 carcaça (m^2);

$$As = 2x \left(\pi x \left(\frac{0,425}{2} \right)^2 - \pi x \left(\frac{0,380}{2} \right)^2 \right) + 0,510 x 2 x \pi x \left(\frac{0,425}{2} + \frac{0,380}{2} \right) \quad (22)$$

$$As = 1,34668 m^2 \quad (23)$$

k = fator de condutividade térmica do material da carcaça FC-200 (W/m.K);

$$k = 50 \text{ (W/m.K) (Matmatch, 2021)} \quad (24)$$

Bi = número de Biot;

$$Bi = \frac{5 x \frac{0,01451}{1,34668}}{50} = 0,001077 \quad (25)$$

Uma vez que se verificou que $Bi < 0,1$ foi possível determinar o tempo necessário para a carcaça atingir a temperatura de 100 °C.

3º) Cálculo do tempo de aquecimento

Para calcular o tempo de aquecimento de cada carcaça recorreu-se à equação (6):

$$t = \frac{\rho x cp x V}{h x As} x \ln \left(\frac{T_{inicial} - T_{infinity}}{T_{final} - T_{infinity}} \right) \quad (6)$$

Aonde:

ρ = massa específica do material FC-200 = 7150 ($kg \cdot m^{-3}$) (Matmatch, 2021);

cp = calor específico do material FC-200 = 460 (J/kg.K) (Matmatch, 2021);

V = volume de 1 carcaça (m^3);

h = coeficiente de convecção total (W/($m^2 \cdot K$));

A = Área exposta de 1 carcaça (m^2);

$T_{inicial}$ = temperatura inicial da carcaça = 293,15 K;

$T_{infinity}$ = temperatura do fluido = 473,15 K;

T_{final} = temperatura final da carcaça = 373,15 K.

t = tempo de aquecimento da carcaça (s)

$$t = 4166 s$$

A base de cálculo permitiu obter o valor necessário de aquecimento da carcaça. Deste modo, através do método da capacidade concentrada obteve-se o valor de 4166 s, aproximadamente 70 minutos.

O passo seguinte da análise de melhoria foi a elaboração de uma estimativa de gastos mensais associados ao aquecimento de carcaças.

Estimativa de gastos mensais associados ao aquecimento de carcaças

Para se proceder ao aquecimento das carcaças, considerou-se uma estufa industrial com uma potência útil de 35 KW e cuja dimensão é de 2,80m x 2,60 m x 2,30m. A estufa de aquecimento tem incluída uma base capaz de suportar as carcaças que necessitam de aquecimento. A base da estufa tem capacidade de suportar o máximo de oito carcaças e a sua dimensão e dimensão de cada carcaça encontram-se na figura 68:

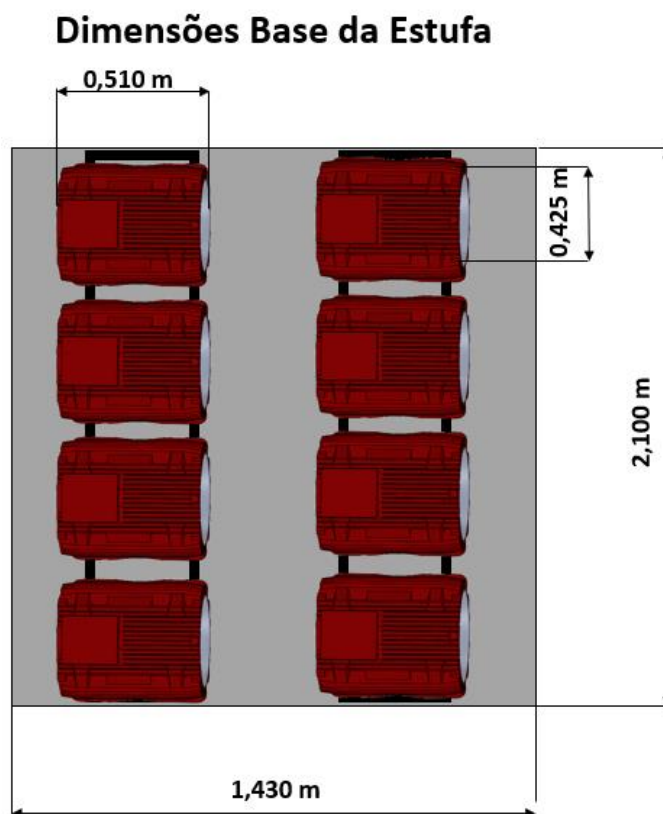


Figura 68 - Dimensões da base da estufa de aquecimento

De seguida, foi analisado o número médio mensal de motores do tipo 250 inseridos. A tabela 24 apresenta a análise efetuada.

Tabela 23 - Análise de motores do tipo 250 inseridos de maio a agosto de 2021

Quantidade de motores do tipo 250 inseridos de maio a agosto de 2021	454
Número médio mensal de motores do tipo 250 inseridos	114

Verificou-se, deste modo, que em média, por mês, são inseridos 114 motores do tipo 250. Considerando a operabilidade da estufa em capacidade máxima, ou seja, 8 carcaças de cada vez, o número de ciclos de aquecimento mensais foi calculado pela equação (26):

$$\begin{aligned} \text{Número de ciclos de aquecimento} &= \frac{\text{Número médio mensal de motores introduzidos}}{\text{Capacidade máxima da base da estufa}} \quad (26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Número de ciclos de aquecimento} &= \frac{114}{8} = 14,250 \\ &= 15 \text{ ciclos necessários} \end{aligned}$$

O tempo total de aquecimento despendido nos 15 ciclos foi calculado pela equação (27):

$$\text{tempo total de aquecimento (min)} = N^{\circ} \text{ de ciclos necessários} \times 70 \quad (27)$$

$$\text{tempo total de aquecimento (min)} = 15 \times 70 = 1\,050 \text{ min}$$

Desta forma, o custo mensal de aquecimento de carcaças do tipo 250 foi calculado seguindo a equação (28):

$$\text{Custo de aquecimento (€)} = \quad (28)$$

$$\text{tempo total de aquecimento (h)} \times \text{Potência útil estufa (KW)} \times \text{Custo KW}$$

$$\text{Custo de aquecimento mensal (€)} = 17,5 \times 35 \times 0,12 = € 73,50$$

Foi, então, estimado um gasto mensal de € 73,5 em gastos de aquecimento de carcaças de motores do tipo 250. Vale a pena salientar que se considerou a utilização de uma estufa presente em chão de fábrica e previamente adquirida pela empresa. Logo, não foi considerado o custo de aquisição da estufa elétrica.

Validação da proposta de melhoria

A fim de ser possível validar a proposta de solução, elaborou-se a árvore de amostragem com a estratégia necessária à recolha de dados. Elaborou-se uma árvore de amostragem que contempla o teste de 3 introduções em condições *standard* de operação (sem aquecimento) e 3 introduções com a proposta de melhoria de aquecimento de carcaças. Os sistemas de medição de diâmetros e temperatura necessários à recolha de dados foram previamente validados na **secção 3.3.6**.

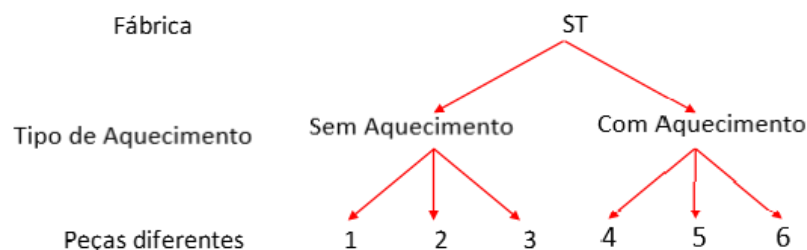


Figura 69 - Árvore de amostragem da análise de aquecimento de carcaças

Devido a limitações de tempo, não foi possível realizar a recolha de dados necessária para a validação da proposta de melhoria.

3.4.4 Alteração do Projeto da Ferramenta

Uma das soluções elaboradas no presente caso de estudo diz respeito à proposta de uma ferramenta mais robusta através da alteração do projeto da ferramenta atual.

Desta maneira, é esperado que ao haver a alteração do projeto da ferramenta, a próxima ferramenta a ser adquirida apresente uma maior robustez provocando um impacto direto na sua durabilidade e na redução de possíveis custos corretivos e preventivos associados a estas ferramentas.

Assim, pretende-se aumentar a robustez através da alteração de material e de diversas características dimensionais.

Para este efeito, recorreu-se à simulação FEA disponível no *software Solidworks* de modo a averiguar características estáticas das duas ferramentas analisadas: ferramenta atual e ferramenta futura. Posteriormente procedeu-se a uma análise comparativa das duas ferramentas baseada em resultados fornecidos pela simulação do *Solidworks*.

Teoria:

- Com a alteração do projeto da ferramenta é esperado que a próxima ferramenta a ser adquirida seja mais robusta;

Efeitos Esperados:

- ∩ Aquisição de uma nova ferramenta mais robusta;
- ∩ Aumento da vida útil da ferramenta de inserção de estatores em carcaças de motores elétricos.

3.4.4.1 Análise Estática da Ferramenta Atual

A ferramenta atualmente utilizada (figura 70), cujo desenho se encontra no Anexo 7.8, é constituída por três elementos principais: tubo, aro Interior e cutelo.

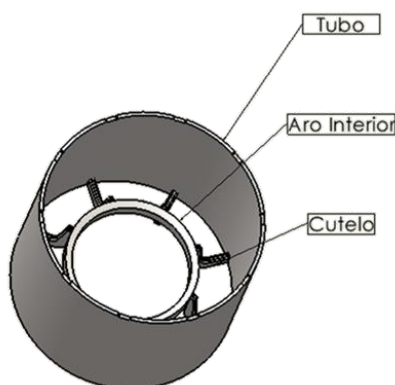


Figura 70 - Principais Componentes da ferramenta de inserção de estator em carcaça

A ferramenta foi elaborada com o material St-37, da família dos aços e apresenta uma massa de 18,21 kg.

Após a elaboração do desenho CAD da ferramenta atual, importou-se o CAD para o ambiente de simulação. A primeira etapa passou pela atribuição do material à peça. A tabela 25 apresenta as principais características do material St-37.

Tabela 24 - Características do material da ferramenta atual - St-37 (Solidworks, 2021)

Característica	Valor	Unidade
Módulo de elasticidade longitudinal (em módulo de <i>Young</i>)	210 000	MPa
Massa volúmica	7 800	kg/m ³
Tensão limite de cedência	235	MPa
Tensão de rotura	360	MPa

De seguida, foi estabelecida a fixação da ferramenta tal como é visível na figura 71. Definiu-se a base da ferramenta como local de fixação. Esta área contacta a ferramenta com o prato da prensa hidráulica.

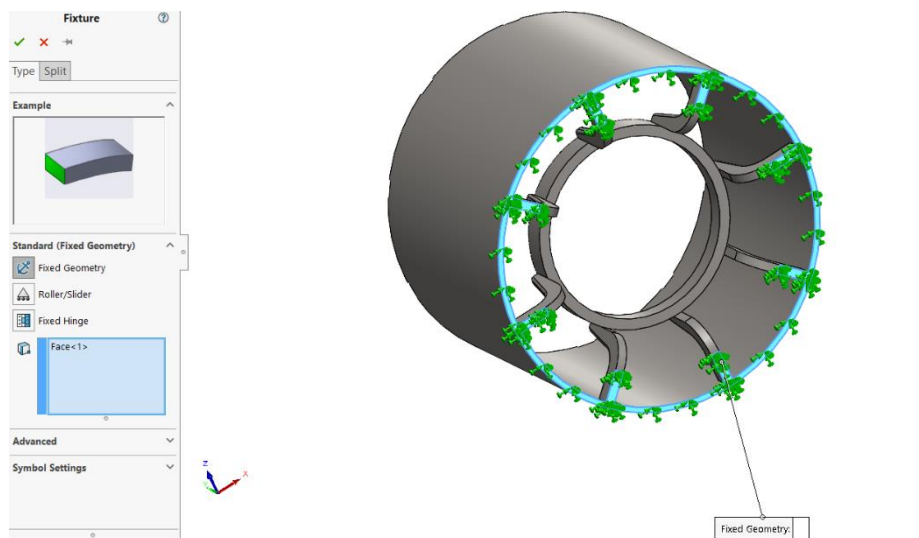


Figura 71 - Zona de fixação da ferramenta atual

Posteriormente, foi necessário definir a força aplicada na peça e a área da sua aplicação. Decidiu-se restringir a aplicação da força a 3/10 da área de contacto entre a ferramenta e o estator de modo a acentuar o efeito da deformação e maximizar o efeito de ovalização, que é um dos principais motivos de sucateamento desta ferramenta. Desta forma, simulou-se um caso de desalinhamento em que a força é concentrada numa pequena área (figura 72).

A carga escolhida foi de 444 587,363 N. Este valor corresponde ao valor médio da força da prensa proveniente dos dados correspondentes à situação *standard* abordada na **secção 3.3.3** e representados na tabela 26.

Tabela 25 - Dados Coletados - Força de prensagem (N)

Tipo de Motor	F_prensa (N)	Média F_prensa (N)
250	443952,815	444 587,363
	443952,815	
	447760,103	
	436338,240	
	443952,815	
	451567,391	

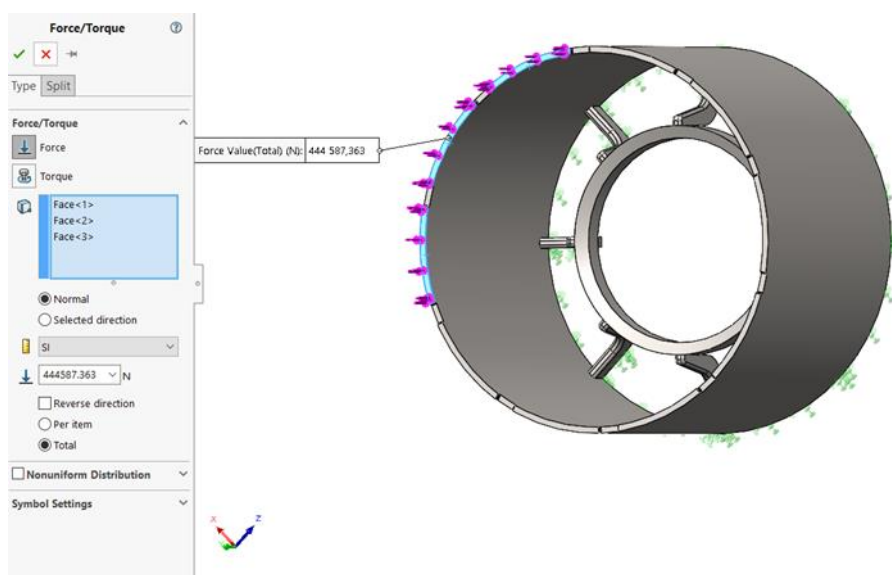


Figura 72 - Detalhes da força e área de aplicação na ferramenta atual

De seguida, gerou-se a malha. O tipo de malha escolhido foi a *curvature-based mesh*. Preferiu-se a escolha da *curvature-based mesh* em relação da *standard mesh* uma vez que a malha *curvature-based mesh* apresenta maior densidade nas zonas mais críticas da peça. Assim, a malha elegida apresenta mais elementos finitos nas zonas aonde existe maior criticidade geométrica. O tipo de elementos finitos utilizados foi tetraedros lineares.

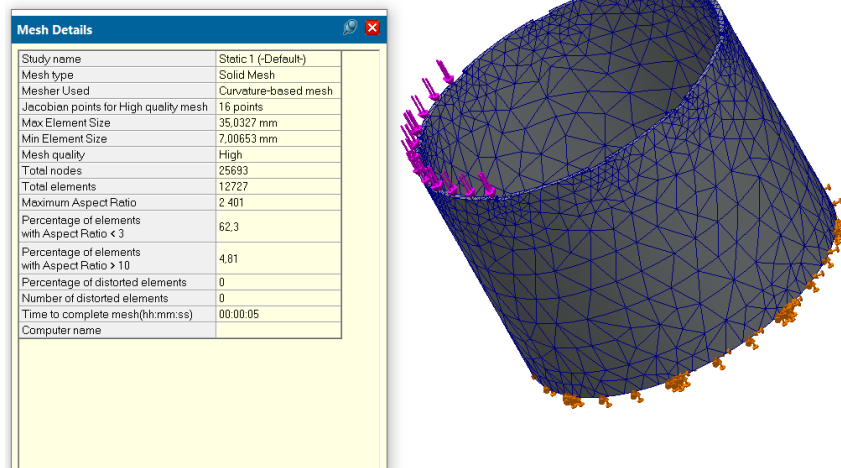


Figura 73 - Detalhes da malha *curvature-based mesh* da ferramenta atual

Depois de a malha e os parâmetros terem sido definidos, foi possível correr a simulação de análise estática linear, de onde foi possível retirar várias informações acerca do comportamento da ferramenta atual quando lhe é aplicada uma força de 444 587,363 N em 3/10 da área de contacto com o estator. Verifica-se que a tensão equivalente von Mises máxima aplicada é de 311 MPa. De verificar que a tensão equivalente von Mises máxima aplicada é superior em 32,3% em relação à tensão de cedência. Verifica-se, portanto, a elevada tendência para deformações plásticas da ferramenta durante o seu funcionamento, o que resulta no comportamento descrito na **secção 3.1**. A figura 74 apresenta a análise de tensões equivalentes e von Mises da ferramenta atual considerando a ampliação do deslocamento de 90,6199.

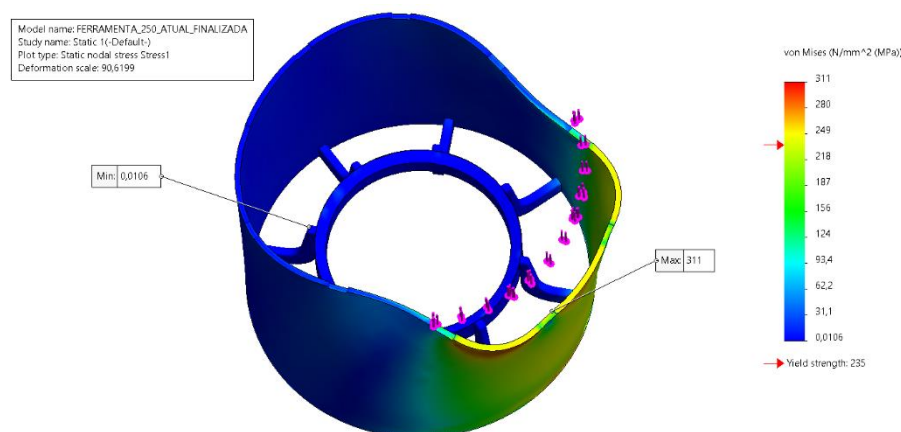


Figura 74 - Análise de tensões equivalentes de von Mises da ferramenta atual

De seguida foram analisados os deslocamentos resultantes da peça nas condições de carga anteriormente referidas. Verificou-se um deslocamento resultante máximo de

0,519 mm. A figura 75 apresenta a análise de deslocamentos resultantes considerando a ampliação do deslocamento de 90,6199.

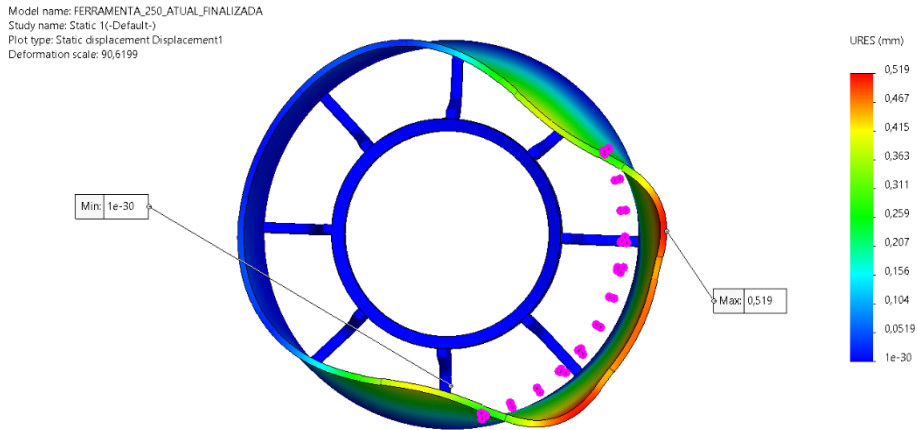
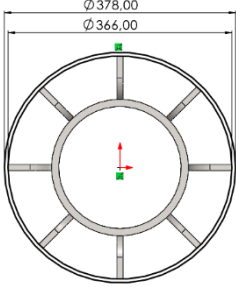
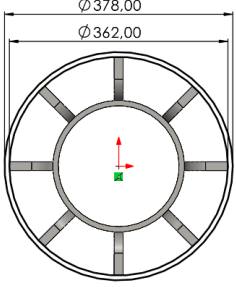


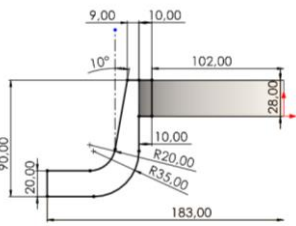
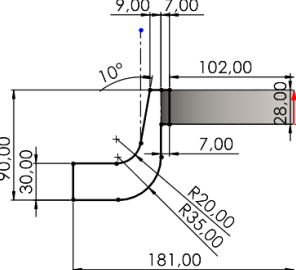
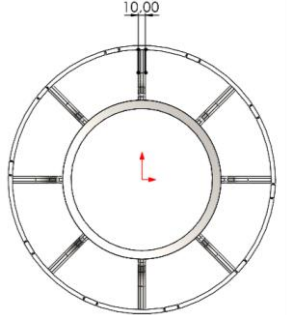
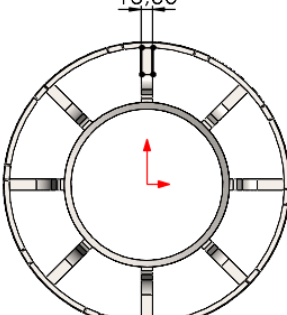
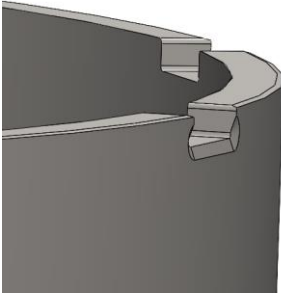
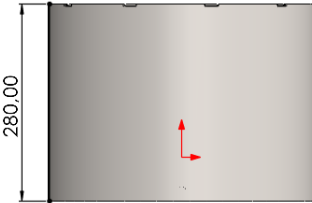
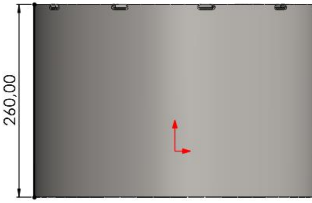
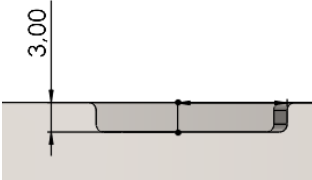
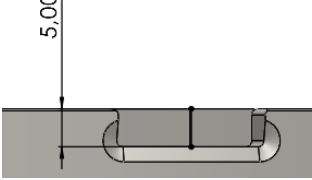
Figura 75 - Análise de deslocamentos resultantes da ferramenta atual

3.4.4.2 Análise Estática da Ferramenta Futura

A fim de ser possível elaborar uma proposta de ferramenta mais robusta, foram implementadas alterações dimensionais e de material. Na tabela 27 estão referenciadas todas as alterações feitas no CAD da ferramenta atual de modo a obter-se uma ferramenta futura com maior robustez.

Tabela 26 - Alterações do desenho CAD da ferramenta futura

Alteração	Ferramenta Atual	Ferramenta Futura	Observações
Alteração de material	St-37 σ limite cedência = 235 MPa	AISI 1020 σ limite cedência = 351 MPa	- Escolha de um material com maior tensão de cedência de modo a aumentar a tensão máxima que a ferramenta consegue suportar sem que se deforme plasticamente.
Aumento da espessura do tubo			- Aumento da área de contacto entre a ferramenta e o estator.

<p>Aumento da altura dos cutelos</p>			
<p>Aumento de espessura dos cutelos</p>			
<p>Chanfro na aresta externa do tubo</p>			<ul style="list-style-type: none"> - Eliminação da aresta viva da face externa do tubo; - Evitar acumulação de material durante o arrastamento da carcaça pela superfície externa da ferramenta.
<p>Redução da altura da ferramenta</p>			<ul style="list-style-type: none"> -Aumento da rigidez; - Diminuição do efeito de encurvadura;
<p>Aumento da altura de rasgos do tubo</p>			<ul style="list-style-type: none"> - Aumento da altura dos rasgos do tubo de modo a facilitar o manuseamento da alavanca durante a centralização do estator.

Após a elaboração do desenho CAD da ferramenta futura (Anexo 7.9), importou-se o CAD para o ambiente de simulação. A primeira etapa passou pela atribuição do material à peça cuja massa estimada é de 22,89 kg. A tabela 27 apresenta as principais características do material AISI 1020.

Tabela 27 - Características do material da ferramenta futura - AISI 1020 (Solidworks, 2021)

Característica	Valor	Unidade
Módulo de elasticidade longitudinal (em módulo de <i>Young</i>)	200 000	MPa
Massa volúmica	7 900	Kg/m ³
Tensão limite de cedência	351	MPa
Tensão de rotura	420	MPa

De seguida, foi estabelecida a fixação da ferramenta. Definiu-se a base da ferramenta como local de fixação tal como é visível na figura 76.

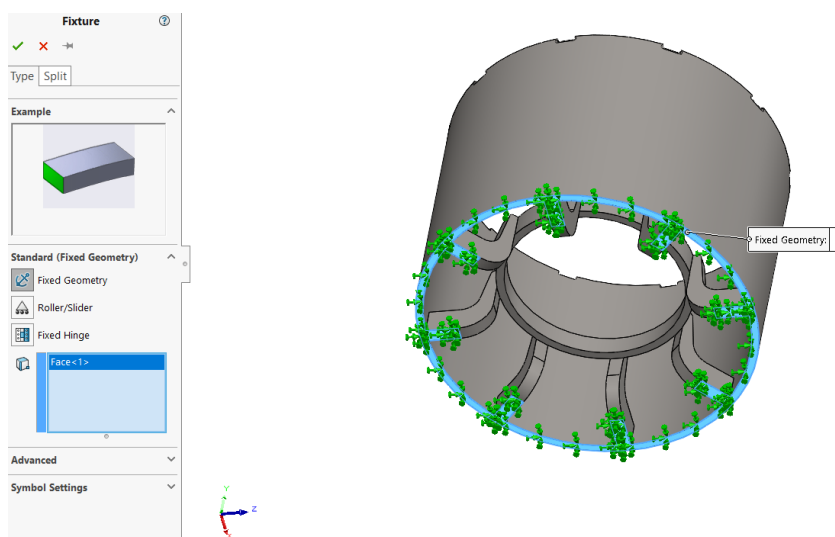


Figura 76 - Zona de fixação da ferramenta futura

Posteriormente, definiu-se a força e a sua área de aplicação. Mantiveram-se as mesmas condições que na análise estática da ferramenta atual. A carga escolhida foi de 444 587,363 N e a área de aplicação correspondeu a 3/10 da área de contacto entre a ferramenta e o estator (figura 77).

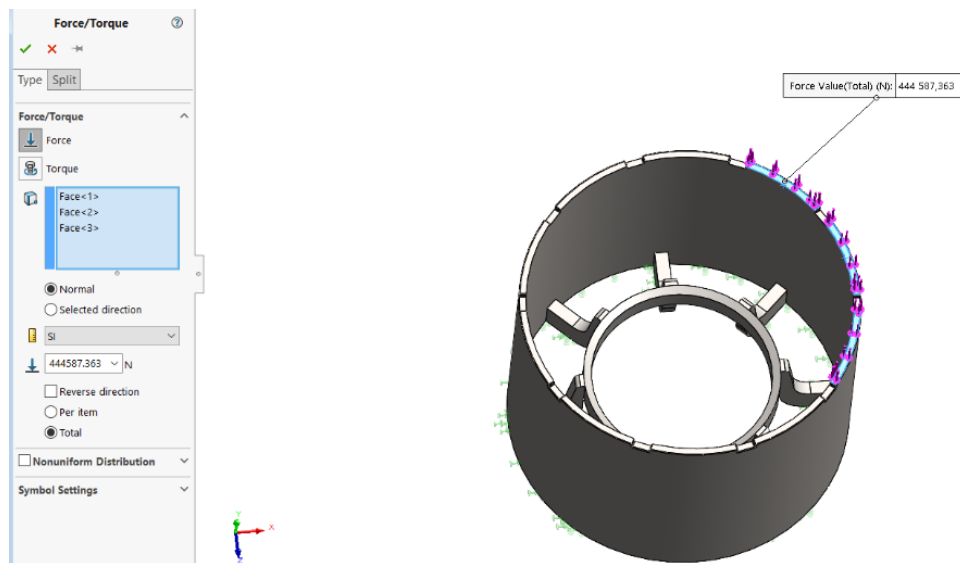


Figura 77 - Detalhes da força e área de aplicação na ferramenta futura

O tipo de malha escolhido foi a *curvature-based mesh* devido às razões mencionadas na análise anterior. O tipo de elementos finitos utilizados foi tetraedros lineares.

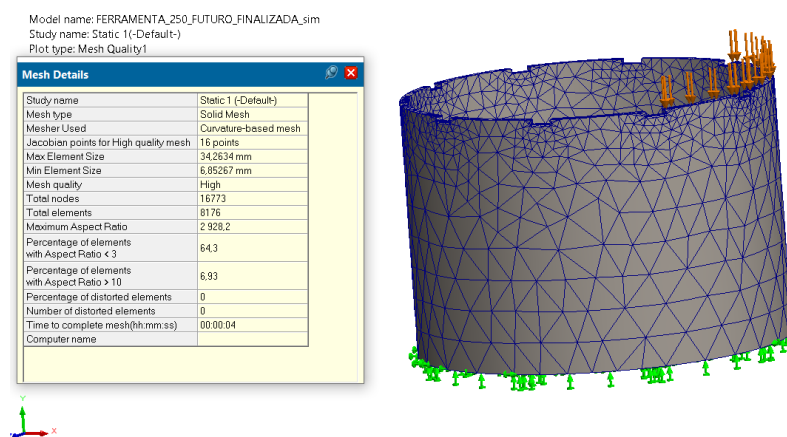


Figura 78 - Detalhes da malha curvature-based mesh da ferramenta futura

Depois da malha e dos parâmetros terem sido definidos, foi possível correr a simulação, e retirar várias informações acerca do comportamento da ferramenta futura quando sujeitas às condições mencionadas.

Verifica-se que a tensão equivalente von Mises máxima aplicada é de 376 MPa. Importa realçar que a tensão equivalente von Mises máxima aplicada é superior em 6,8% em relação à tensão de cedência do material. A figura 79 apresenta a análise de tensões equivalentes von Mises da ferramenta futura considerando a ampliação do deslocamento de 157,444.

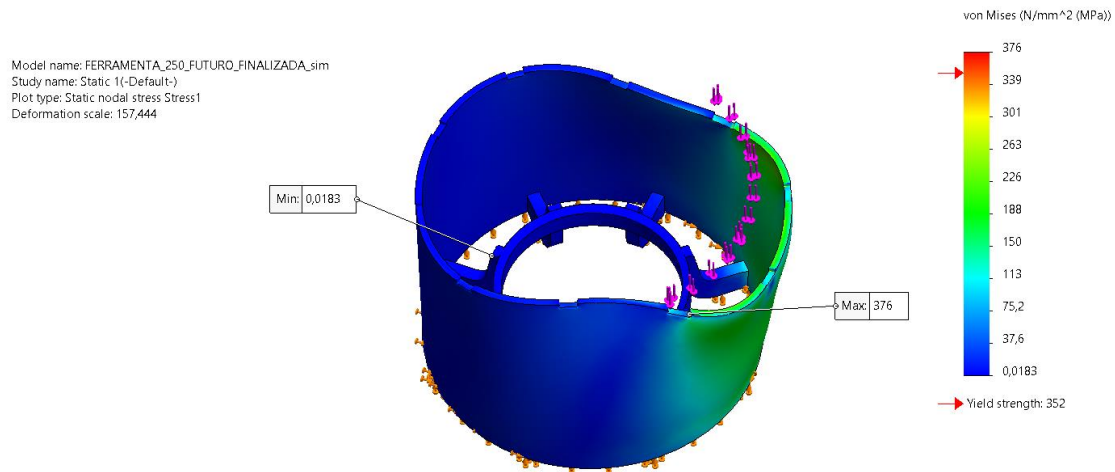


Figura 79 - Análise de tensões equivalentes de von Mises da ferramenta futura

De seguida foram analisados os deslocamentos resultantes peça nas condições de carga anteriormente referidas. Verificou-se um deslocamento resultante máximo de 0,324 mm. A figura 80 apresenta a análise de deslocamentos resultantes considerando a ampliação do deslocamento de 157,444.

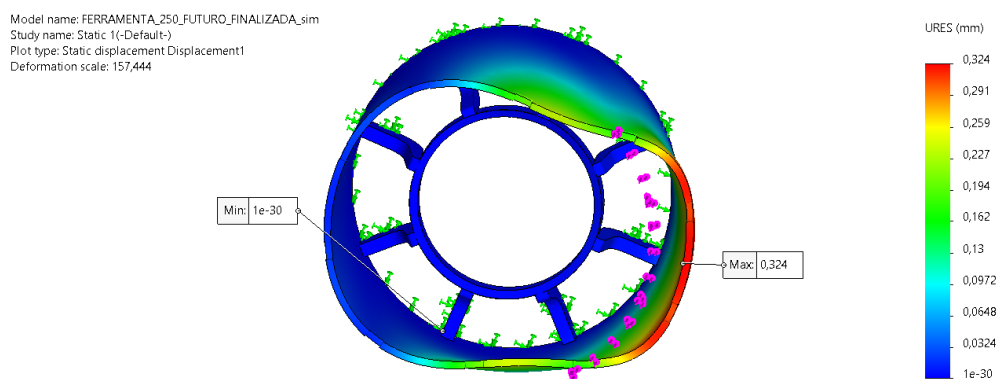


Figura 80 - Análise de deslocamentos resultantes da ferramenta futura

3.4.4.3 Análise Comparativa de Resultados – Análise Estática

Tendo em consideração os resultados obtidos nas análises estáticas realizadas, é possível proceder a uma análise comparativa dos resultados obtidos.

Verificou-se que nas duas análises, a zona de maior deformação se situou na parte superior de contacto da ferramenta com o estator. Para além da zona de maior deformação foi possível verificar alguns resultados. Na tabela 29 estão apresentados resultados comparativos provenientes das análises das duas ferramentas.

Tabela 28 - Análise comparativa de resultados - Análise Estática

Parâmetro	Ferramenta Atual	Ferramenta Futura	Ganho / Perda
Massa (kg)	18,210	22,890	Perda – ferramenta futura apresenta uma massa superior de 4,68 kg.
σ limite cedência do material (MPa)	235	351	Ganho – o material da ferramenta futura apresenta um valor de σ limite cedência superior.
Deslocamento resultante (mm)	0,519	0,324	Ganho – ferramenta futura apresenta uma deformação menor em 0,195 mm do que a ferramenta atual (comparação na mesma zona).

3.4.4.4 Orçamento de Ferramenta Futura

Foi pedido um orçamento ao fornecedor da ferramenta de inserção de estatores em carcaças de motores elétricos. O custo unitário de aquisição da ferramenta cujo desenho se encontra no anexo 7.9 foi de € 550,00.

3.4.5 Elaboração de Plano de Implementação

Após as propostas de solução terem sido elaboradas, formulou-se um plano de implementação da sugestão de melhoria de alteração do projeto da ferramenta representado na figura 81. Definiu-se como data de início o próximo sucateamento das ferramentas presentes em chão de fábrica, não sendo então possível especificar a data de início da implementação.

PLANO DE IMPLEMENTAÇÃO				
PROJETO	AUMENTO DA VIDA ÚTIL DE UMA FERRAMENTA UTILIZADA NA INDÚSTRIA ELÉTRICA		DATA ESTIMADA DE CONCLUSÃO	4 MESES
Tarefa	Responsável	Data de Início	Data de Conclusão	Comentários
Teste da ferramenta futura proposta	Equipa de Engenharia de Processos Industriais	Próximo Sucateamento de ferramentas presentes em chão de fábrica	-	

Figura 81 - Plano de implementação

3.5 Fase Control

A fase *Control* é aplicada com a finalidade de controlar as sugestões de melhoria implementadas, de modo a garantir que o processo analisado não sofre desvios.

Uma vez que nenhuma das sugestões de melhoria foi implementada durante o período do estágio, não foram controladas sugestões de melhoria. Contudo, criou-se um relatório de controlo das próximas ferramentas de introdução a serem adquiridas. Assim, possibilita-se a verificação mensal do estado das ferramentas a serem utilizadas.

Neste relatório de verificação é pretendido que o operador registre os valores encontrados na secção (a) e identifique os possíveis erros de forma encontrados na ferramenta que não sejam dimensionais (b). Os erros de forma podem ser os seguintes:

- Oxidação;
- Ferramenta com marcação ilegível;
- Deformação;
- Fissuras;
- Outros.

Finalmente é esperado que o operador defina o status da ferramenta (c). Os dois tipos de status podem ser os seguintes:

- Aprovado – quando a ferramenta se encontra verificada e as suas cotas se encontram dentro da especificação;

- Reprovado – quando a ferramenta se encontra verificada e as suas cotas se encontrem fora da especificação.


 RELATÓRIO DE CONTROLE DE FERRAMENTAL CRÍTICO					Pág.1 de 1		
Departamento:				Seção:			
Denominação Equipamento:							
Centro de Trabalho:							
Ferramental:				ID:			
Periodicidade: 1 MES							
Data da Liberação:				Data próxima verificação:			
Status Ferramental: c) <input type="checkbox"/> Aprovado				<input type="checkbox"/> Reprovado <input type="checkbox"/> Ferramentaria			
MEDIDAS					ERROS DE FORMA		
Descrição Cota	Cota	Tl.Min.	Tl.Máx.	Encontr.	Tipo	Tl.Máx.	Encontr.
Diametro	378,000	376,500	379,000	a)		b)	
Diametro ponto 2 a 90°	378,000	376,500	379,000				
FERRAMENTARIA							
(Claim) no SAP:							
Prioridade:							
Solicitante:							
Responsável da Ferramentaria:							
Data início:							
Data término:							

Figura 82 - Relatório de controlo de ferramental crítico

ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

4 ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

O desenvolvimento do presente caso de estudo visou a avaliação do aumento da vida útil de uma ferramenta utilizada na indústria elétrica: ferramenta de inserção de estatores em carcaças de motores elétricos.

Neste sentido, foi utilizada a filosofia *Six-Sigma*. Implementou-se a abordagem DMAIC que, devido ao facto de ser sistemática e disciplinada, permitiu a análise de quatro grupos principais de propostas de melhorias:

- a) Alteração do produto aplicado;
 - b) Centralização correta do conjunto Estator + Carcaça;
 - c) Aquecimento prévio das carcaças;
- Alteração do projeto da ferramenta.

Os três primeiros grupos de melhorias foram criados em resposta à causa raiz identificada de elevado coeficiente de atrito.

Relativamente à alteração do produto aplicado, foram analisadas duas sugestões. A primeira sugestão foi relativa à utilização de spray congelante cujo objetivo era a anulação do aperto existente entre o estator e a carcaça devido ao efeito da temperatura sobre o material do estator. Testou-se a solução e verificou-se que não foi uma proposta de solução viável, logo, não foi implementada. A segunda sugestão de alteração do produto aplicado foi a utilização de um spray anti atrito cujo objetivo era a diminuição do coeficiente de atrito. Foi realizada uma análise DOE com o objetivo de estudar a interferência de vários tipos de produtos aplicados em diversas posições de estatores. Após a realização do ensaio *Full Factorial* concluiu-se que não é provável que a alteração do produto aplicado e respetiva posição de aplicação tenham um impacto significativo na diminuição do coeficiente de atrito. Como a solução não foi validada, não se implementou a proposta de solução.

Relativamente à centralização correta do conjunto Estator + Carcaça foram propostas duas ações de melhoria. A primeira proposta foi relativa à utilização de caixas nos olhais de transporte de carcaças. Procedeu-se à recolha de dados de seis experiências e verificou-se que a proposta de melhoria de utilização de blocos nos olhais não foi validada. Logo, esta proposta de melhoria não foi implementada. A segunda proposta de melhoria foi relativa à utilização de uma ferramenta protetora de resina. Verificou-se que a ferramenta protetora de resina sofreu empeno no final da utilização na primeira amostra. Consequentemente, a recolha de dados desta sugestão de melhoria ficou comprometida. Não foi possível validar a proposta de melhoria e, por isso, não se implementou a proposta de solução.

Relativamente ao aquecimento prévio de carcaças foi proposta a sugestão de melhoria de aquecimento de carcaça de modo a provocar uma situação de folga entre o acoplamento dos elementos estator e carcaça. Calculou-se o tempo de aquecimento de cada carcaça e estimou-se o custo de aquecimento mensal (€ 73,50). Devido a limitações de tempo, não foi possível realizar a recolha de dados necessária para a validação da proposta de melhoria. Não foi possível validar a proposta de melhoria e, por isso, não se implementou a proposta de solução.

O último grupo de melhoria é composto por uma proposta de alteração da ferramenta utilizada. Deste modo, foi proposta uma ferramenta mais robusta capaz de provocar um impacto direto na sua durabilidade e na redução de futuros custos corretivos e preventivos. Foi realizada uma análise estática à nova ferramenta e verificou-se um aumento de massa (a ferramenta futura apresenta uma massa superior de 4,680 kg). Verificou-se também que a ferramenta futura consegue suportar um valor de tensão superior sem que se deforme plasticamente e apresenta uma deformação menor em 0,195 mm do que a ferramenta atual. Foi pedido um orçamento para a ferramenta futura e obteve-se o valor de € 550,00. Sabendo que o custo médio unitário de aquisição da ferramenta no ano de 2021 foi de € 538,00 e que o orçamento foi de € 550,00, como a ferramenta futura apresenta uma maior robustez comprovada pela análise FEA, justifica-se a alteração do projeto da ferramenta.

CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES



5.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

5 CONCLUSÕES E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Após a conclusão do período de estágio, foi possível tecer algumas conclusões relativas ao trabalho desenvolvido. Deste modo, tendo como base os objetivos especificados no primeiro capítulo da presente dissertação foram enumeradas as respetivas conclusões. A tabela 29 apresenta sumariamente as soluções e medidas implementadas correspondentes a cada objetivo definido.

Tabela 29 - Soluções e medidas implementadas correspondentes a cada objetivo definido

Objetivo	Solução / Medidas Implementadas	Status
Análise e caracterização do processo de introdução de estatores em carcaças de motores elétricos.	Na fase <i>Define</i> da metodologia DMAIC foram definidos aspetos relevantes à compreensão do processo industrial de introdução de estatores em carcaças de motores elétricos. O processo foi caracterizado com figuras e apresentaram-se as principais características da prensa hidráulica utilizada no processo industrial. Utilizou-se a ferramenta SIPOC para perceber as interações entre as entradas, saídas, fornecedores e clientes do processo industrial.	
Análise de dados históricos relativos ao dano e sucateamento da ferramenta.	Na fase <i>Define</i> , recorreu-se à análise gráfica para ser possível caracterizar convenientemente o problema. Analisaram-se dados relativos a gastos de aquisição de ferramentas e custos unitários de ferramentas. Na fase <i>Measure</i> analisou-se a quantidade de ferramentas danificadas, sucateadas e preservadas e utilizou-se a ferramenta diagrama de pareto para perceber qual o tipo de ferramenta que	

	mais contribuiu para o problema de dano de ferramenta.	
Identificação da causa raiz da elevada necessidade de substituição de ferramenta.	Durante a fase <i>Analyse</i> recorreu-se às ferramentas <i>5 Why's</i> , <i>brainstorming</i> e diagrama Ishikawa para determinar a causa raiz do problema.	
Validação dos sistemas de medição utilizados na recolha de dados do presente trabalho.	Recorreu-se à técnica MSA para analisar o sistema de medição utilizado na recolha de dados do caso de estudo.	
Conceção de propostas de solução de aumento da vida útil da ferramenta.	Na fase <i>Improve</i> foram elaboradas propostas de solução de aumento da vida útil da ferramenta: Alteração do produto aplicado; Centralização correta do conjunto Estator + Carcaça; Aquecimento prévio das carcaças; - Alteração do projeto da ferramenta.	
Implementação de soluções que visem minimizar a substituição da ferramenta.	Foi elaborado um plano de implementação de soluções que visam minimizar a substituição da ferramenta.	
Análise de custo das soluções estudadas.	Foi efetuada uma análise de custo das soluções de melhoria. Verificou-se que o aquecimento de carcaças está associado ao gasto mensal de € 73,50 e a aquisição de uma ferramenta melhorada apresenta um custo de € 550,00.	

5.2 Proposta de trabalhos futuros

Como primeira proposta de trabalho futuro sugere-se o teste de aquecimento de carcaças cuja árvore de amostragem se encontra na figura 69. Caso a proposta de solução seja validada, a sugestão de melhoria poderá ser implementada.

Como segunda proposta de trabalho futuro sugere-se o estudo do desfasamento entre o valor teórico de aperto entre o estator e a carcaça (baseado nas dimensões presentes

nos desenhos dos dois elementos) e o valor real de aperto (calculado após a medição em chão de fábrica de componentes). Tal como é possível verificar na análise MSA realizada, no cálculo de componentes de variação realizado na **secção 3.3.6.1** observou-se que mais de 80% da variação dos dados da amostra foi causada pela variação do local de medição. Deste modo, o valor de aperto entre diversos pontos da carcaça e do estator não permaneceu constante. Esta situação carece de futuro estudo uma vez que a instabilidade do valor de aperto apresenta interferência no coeficiente de atrito analisado.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

6 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Abele, E., Metternich, J., Tisch, M., & Reitberger, T. (2018). *Learning Factories: Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92261-4>
- Agrawal, K. C. (2001a). 1 - Theory, Performance and Constructional Features of Induction Motors. In K. C. B. T.-I. P. E. H. Agrawal (Ed.), *Newnes Power Engineering Series* (pp. 1–34). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-075067351-8/50079-9>
- Agrawal, K. C. (2001b). *Industrial Power Engineering Handbook*. Elsevier Science. <https://books.google.pt/books?id=V1pepm-1m-cC>
- Ahmed, M., & Ahmad, N. (2011). *An Application of Pareto Analysis and Cause-and-Effect Diagram (CED) for Minimizing Rejection of Raw Materials in Lamp Production Process*. 5.
- Antony, J., & Banuelas, R. (2002). Key ingredients for the effective implementation of Six Sigma program. *Measuring Business Excellence*, 6, 20–27. <https://doi.org/10.1108/13683040210451679>
- Antony, J., & Coronado, R. B. (2001). A strategy for survival. *Manufacturing Engineer*, 80, 119–121. <https://doi.org/10.1049/me:20010308>
- Barbosa, B., Pereira, M. T., Silva, F. J. G., & Campilho, R. D. S. G. (2017). Solving Quality Problems in Tyre Production Preparation Process: A Practical Approach. *Procedia Manufacturing*, 11, 1239–1246. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2017.07.250>
- Basu, R. (2009). *Implementing Six Sigma and Lean: A Practical Guide to Tools and Techniques*. Elsevier Butterworth-Heinemann. <https://books.google.pt/books?id=b-ytbXcvM9UC>
- Behr, A., Moro, E. L. da S., & Estabel, L. B. (2008). Gestão da biblioteca escolar: metodologias, enfoques e aplicação de ferramentas de gestão e serviços de biblioteca. *Ciência Da Informação*, 37(2), 32–42. <https://doi.org/10.1590/S0100-19652008000200003>
- Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley. <https://books.google.pt/books?id=vvyloXEywMoC>
- Bloch, H. P. (2017). Management and Organizational Leadership. In *Petrochemical Machinery Insights* (pp. 223–250). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809272-9.00019-0>
- Breyfogle, F. W. (2003). *Implementing Six Sigma: Smarter Solutions Using Statistical Methods*. Wiley. https://books.google.pt/books?id=_zeZDwAAQBAJ
- Business Audit Compliance*. (n.d.). Retrieved May 18, 2021, from <https://auditandcompliance.wordpress.com>
- Cagnazzo, L., Sibalija, T., & Vidosav, M. (2010). *The Measurement System Analysis as a Performance Improvement Catalyst: A Case Study* (pp. 269–292). https://doi.org/10.1007/978-3-642-04800-5_18
- Carpenter, J. (2010). *Project Management in Libraries, Archives and Museums: Working with Government and Other External Partners*. Elsevier Science. <https://books.google.pt/books?id=rRVtAgAAQBAJ>
- Cato, W. W., & Mobley, R. K. B. T.-C.-M. M. S. (Second E. (Eds.). (2002). *Front Matter* (p. iii). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7473-7.50017-6>
- Chandrasekaran, R., Campilho, R. D. S. G., & Silva, F. J. G. (2019). Reduction of scrap percentage of cast

- parts by optimizing the process parameters. *Procedia Manufacturing*, 38, 1050–1057. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.01.191>
- Chapman, S. J. (2012). *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill. <https://books.google.pt/books?id=wyHAuQAACAAJ>
- Costa, J. P., Lopes, I. S., & Brito, J. P. (2019). Six Sigma application for quality improvement of the pin insertion process. *Procedia Manufacturing*, 38, 1592–1599. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.126>
- Costa, T., Silva, F. J. G., & Pinto Ferreira, L. (2017a). Improve the extrusion process in tire production using Six Sigma methodology. *Procedia Manufacturing*, 13, 1104–1111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.171>
- Costa, T., Silva, F. J. G., & Pinto Ferreira, L. (2017b). Improve the extrusion process in tire production using Six Sigma methodology. *Procedia Manufacturing*, 13, 1104–1111. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2017.09.171>
- Cverna, F., & Committee, A. S. M. I. M. P. D. (2002). *ASM Ready Reference: Thermal properties of metals*. ASM International. <https://books.google.pt/books?id=qvrq96gJFxlC>
- Dambhare, S., Aphale, S., Kakade, K., Thote, T., & Borade, A. (2013). Productivity Improvement of a Special Purpose Machine Using DMAIC Principles: A Case Study. *Journal of Quality and Reliability Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/752164>
- Dr. Hollstein, W. (n.d.). *Thermosetting resin systems for stator encapsulation in electro-mobility and industrial motors*.
- Ev, G., Scaria, J., & Antony, J. (2011). Application of Six Sigma Methodology to Reduce Defects of a Grinding Process. *Quality and Reliability Engineering International*, 27, 1221–1234. <https://doi.org/10.1002/qre.1212>
- Ferreira, C., Sá, J. C., Ferreira, L. P., Lopes, M. P., Pereira, T., Ferreira, L. P., & Silva, F. J. G. (2019). iLeanDMAIC – A methodology for implementing the lean tools. *Procedia Manufacturing*, 41, 1095–1102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.10.038>
- Francisco, A. M. S. (2006). *Motores de Indução Trifásicos*.
- Fukuda, I. M., Pinto, C. F. F., Moreira, C. dos S., Saviano, A. M., & Lourenço, F. R. (2018). Design of Experiments (DoE) applied to Pharmaceutical and Analytical Quality by Design (QbD). *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 54(spe). <https://doi.org/10.1590/s2175-97902018000001006>
- FURTADO, D. C. (2014). *Análise estrutural de chassi de veículos automotivos*.
- Glowacz, A. (2018). Acoustic based fault diagnosis of three-phase induction motor. *Applied Acoustics*, 137, 82–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.03.010>
- González, P. U., & Werner, L. (2009). Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais. *Gestão & Produção*, 16(1), 121–132. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2009000100012>
- Guleria, P., Pathania, A., Sharma, S., & Sá, J. C. (2021). Lean six-sigma implementation in an automobile axle manufacturing industry: A case study. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.177>
- Hahn, G. J., Doganaksoy, N., & Stanard, C. (2001). Statistical tools for six sigma. *Quality Progress*, 34, 78–82.
- Harry, M., & Schroeder, R. (2005). *Six Sigma: The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations*. Currency. <https://books.google.pt/books?id=lwxZ18MHh0C>
- Henderson, K., & Evans, J. (2000). Successful implementation of Six Sigma: Benchmarking General Electric Company. *Benchmarking: An International Journal*, 7, 260–282.

- <https://doi.org/10.1108/14635770010378909>
- Hild, C., Sanders, D., & Ross, B. (1999). THE THOUGHT MAP. *Quality Engineering*, 12(1), 21–27. <https://doi.org/10.1080/08982119908962553>
- Industrial, I. N. de M. N. e Q. (2008). *Vocabulário internacional de metrologia: conceitos fundamentais e garras e termos associados ; (VIM 2008)*. INMETRO. <https://books.google.pt/books?id=qFyVmwEACAAJ>
- InfoPedia. (2021). Porto Editora – lei de Pascal na Infopédia. In *Porto Editora*. [https://www.infopedia.pt/\\$lei-de-pascal](https://www.infopedia.pt/$lei-de-pascal)
- Karuppusami, G., & Gandhinathan, R. (2006). Pareto analysis of critical success factors of total quality management: A literature review and analysis. *The TQM Magazine*, 18, 372–385. <https://doi.org/10.1108/09544780610671048>
- Kaushik, P., Khanduja, D., Mittal, K., & Jaglan, P. (2012). A case study: Application of Six Sigma methodology in a small and medium-sized manufacturing enterprise. *The TQM Journal*, 24, 4–16. <https://doi.org/10.1108/17542731211191186>
- Kent, R. B. T.-Q. M. in P. P. (Ed.). (2016). *Front matter* (pp. i–iii). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102082-1.50012-5>
- Khatib, M., Ahmed, R., Uddin, M., Rahman, M., Shareef, M., Akber, S., Khan, M., & Shaikh, S. (2020). Design and Fabrication of 5 Ton Hydraulic Press Machine. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 22–30. <https://doi.org/10.32628/IJSRSET207210>
- KOLLMORGEN. (n.d.). *Mounting and Installation Guidelines*.
- KOSOW, I. I. (1993). *Maquinas eletricas e transformadores*. Globo. <https://books.google.pt/books?id=-xeWPgAACAAJ>
- Kurowski, P. (2013). *Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2013*. SDC Publications, Schroff Development Corporation. <https://books.google.pt/books?id=rAKzqT4edh4C>
- Kwak, Y., & Anbari, F. (2006). Benefits, obstacles, and future of Six Sigma approach. *Technovation*, 26, 708–715. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2004.10.003>
- leanmanufacture*. (n.d.). Retrieved May 17, 2021, from <http://www.leanmanufacture.net/operations/processflowchartsymbols.aspx>
- LOTTERMANN, J. P. T. (2015). *Projeto estrutural de chassi tipo gaiola para veículos minibaja: análise numérica e experimental*.
- Louzada, F., Diniz, C., & Ferreira, P. (2000). *Controle Estatístico de Processos: Uma Abordagem Prática Para Cursos de Engenharia E Administração*. Grupo Gen - LTC. <https://books.google.pt/books?id=d-aBAQAACAAJ>
- Maia, M., Pimentel, C., Silva, F., Godina, R., & Matias, J. (2019). Order fulfilment process improvement in a ceramic industry. *Procedia Manufacturing*, 38, 1436–1443. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.01.144>
- Marques, P., & Requeijo, J. (2021). *SIPOC: A Six Sigma Tool Helping on ISO 9000 Quality Management Systems*.
- Matmatch. (n.d.-a). *JIS G5501 Grade FC200 - Grey Cast Iron - Matmatch*. Retrieved September 10, 2021, from <https://matmatch.com/es/materials/minfm43723-jis-g5501-grade-fc200>
- Matmatch. (n.d.-b). *JIS G5501 Grade FC350 - Grey Cast Iron - Matmatch*. Retrieved September 4, 2021, from <https://matmatch.com/materials/minfm43752-jis-g5501-grade-fc350>
- McAdams, W. H., & Transmission, N. R. C. (U. S.). C. on H. (1954). *Heat Transmission*. McGraw-Hill. <https://books.google.pt/books?id=1ApRAAAAMAAJ>

- Meinrath, G., & Schneider, P. (2007). *Quality Assurance for Chemistry and Environmental Science: Metrology from pH Measurement to Nuclear Waste Disposal*. Springer Berlin Heidelberg. <https://books.google.pt/books?id=o-Kor0oMnPOC>
- Minitab. (2021). *Experimentos fatoriais e fatoriais fracionados*. <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/factorial-and-screening-designs/factorial-and-fractional-factorial-designs/>
- Mishra, P., & Kumar Sharma, R. (2014). A hybrid framework based on SIPOC and Six Sigma DMAIC for improving process dimensions in supply chain network. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 31(5), 522–546. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-06-2012-0089>
- Montgomery, D. C. (2020). *Introduction to Statistical Quality Control*. Wiley. <https://books.google.pt/books?id=oh7zDwAAQBAJ>
- Montgomery, D. C., de Farias, A. M. L., & de Farias e Flores, V. R. L. (2004). *Introdução ao controle estatístico da qualidade*. Grupo Gen - LTC. <https://books.google.pt/books?id=3PO9PgAACAAJ>
- Morais, S. (2015). *Desenho Técnico Básico 3* (26th ed.). Porto Editora.
- Nduka, N., Nwogu, C., & Kalu, G. (2017). Development of a Manually Operated Hydraulic Press and Pull Machine. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 2, 73–77. <https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v2i2.111>
- Okolie, P. C., Obika, E. N., Oluwadare, B. S., Ezenwa, O. N., & Udensi, C. S. (2020). Steel work design and analysis of a 40-ton constant temperature hydraulic press. *Heliyon*, 6(9), e04783. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04783>
- Pande, P. S., Neuman, R. P., & Cavanagh, R. (2007). *Estratégia seis sigma: como a GE, Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho*. Qualitymark. <https://books.google.pt/books?id=DkUBwQEACAAJ>
- Parkash, S., & Kaushik, V. K. (2011). Supplier performance monitoring and improvement (SPMI) through SIPOC analysis and PDCA model to the ISO 9001 QMS in sports goods manufacturing industry. *Scientific Journal of Logistics*.
- Pereira, A., Silva, M., Domingues, M., & Sá, J. (2019). Lean Six Sigma Approach to Improve the Production Process in the Mould Industry: a Case Study. *Quality Innovation Prosperity*, 23, 103–121. <https://doi.org/10.12776/QIP.V23I3.1334>
- Prashar, A. (2014). Adoption of Six Sigma DMAIC to reduce cost of poor quality. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 63. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-01-2013-0018>
- Rashid, M. H. (2014). *Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications*. Pearson. <https://books.google.pt/books?id=KRD9mAEACAAJ>
- Rodrigues, H., Morgado, L., Sá, J., Pinto Ferreira, L., & Campilho, R. (2020). A novel computer application for scrap reporting and data management in the manufacturing of components for the automotive industry. *Procedia Manufacturing*, 51, 1319–1326. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.184>
- Roy, R. (2001). *Design of Experiments Using the Taguchi Approach : 16 Steps to Product and Process Improvement / R.K. Roy*. <https://doi.org/10.1520/JTE12406J>
- Sá, J. C., Vaz, S., Carvalho, O., Lima, V., Morgado, L., Fonseca, L., Doiro, M., & Santos, G. (2020). A model of integration ISO 9001 with Lean six sigma and main benefits achieved. *Total Quality Management & Business Excellence*, 1–25. <https://doi.org/10.1080/14783363.2020.1829969>
- Sales, S. de A. (2016). *Estudo do comportamento térmico do motor de indução trifásico*. Universidade da Beira Interior.
- Salvador, C., & Goldfarb, N. (n.d.). Ishikawa Cause and Effect Diagrams: A Useful Tool in Designing Economic Analyses. *Jefferson Medical College Thomas Jefferson University*.

- Sanders, D., Ross, B., & Coleman, J. (1999). THE PROCESS MAP. *Quality Engineering*, 11(4), 555–561. <https://doi.org/10.1080/08982119908919275>
- Shah, S., Pandya, D., & Gohil, D. (2010). Control chart: A statistical process control tool in pharmacy. *Asian Journal of Pharmaceutics*, 4. <https://doi.org/10.4103/0973-8398.72116>
- Solidworks (2020/2021). (2021).
- Vivek, B., Chinchane, A., & Onkar, S. (2019). *Electric Motor Market by Type (AC Motor, DC Motor, and Hermetic Motor), Output Power (IHP and FHP), Voltage Range (9 V & below, 10-20 V, 21-60 V, 60 V & Above), Application (Industrial Machinery, Motor Vehicle, HVAC Equipment, Aerospace & Transportation)*, .
- Wang, J. X. (2008). *What Every Engineer Should Know About Business Communication*. CRC Press. <https://books.google.pt/books?id=ZyMWY7B1e2kC>
- Wass, J. (2010). *First Steps in Experimental Design_ The Screening Experiment*.
- WEG. (2021a). *Guia de Especificação de Motores Elétricos WEG*.
- WEG. (2021b). *WEG COMPANY PROFILE*.
- Weili, L., Ying, X., Jiafeng, S., & Yingli, L. (2007). Finite-Element Analysis of Field Distribution and Characteristic Performance of Squirrel-Cage Induction Motor With Broken Bars. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(4), 1537–1540. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.892086>

ANEXOS

7 ANEXOS

7.1 Dados Cálculo do Coeficiente de Atrito Experimental - Condições Atuais

Nº Análise	Tipo de Motor	Polaridade	l (estator)	c	b	a	d	P_lida_ manómetro	δ	A lateral (mm²)	p contacto (MPa)	FA (kgf)	FA (N)	μ
1	250	2P	300,000	110,000	212,500	189,883	190,006	116	0,123	358152,558	5,891	45270,588	443952,815	0,210
2	250	4P	360,000	130,000	212,500	189,928	190,030	116	0,102	429837,733	4,674	45270,588	443952,815	0,221
3	250	4P	280,000	130,000	212,500	189,876	190,041	117	0,165	334337,296	7,540	45658,824	447760,103	0,178
4	250	4P	280,000	130,000	212,500	189,863	190,042	114	0,179	334338,762	8,192	44494,118	436338,240	0,159
5	250	4P	280,000	130,000	212,500	189,907	190,026	116	0,119	334310,907	5,439	45270,588	443952,815	0,244
6	250	6+P	270,000	140,000	212,500	189,930	190,027	118	0,097	322372,645	4,256	46047,059	451567,391	0,329
7	225	2P	210,000	103,000	205,000	179,888	180,025	106	0,137	237537,391	7,854	41388,235	405879,939	0,218
8	225	4P	280,000	120,000	205,000	179,943	180,014	114	0,072	316697,463	3,939	44494,118	436338,240	0,350
9	225	6+P	210,000	130,000	205,000	179,847	180,027	109	0,180	237539,590	9,562	42552,941	417301,802	0,184
10	280	4P	230,000	160,000	266,000	239,937	240,038	108	0,102	346887,226	3,447	42164,706	413494,514	0,346
11	280	4P	270,000	160,000	266,000	239,935	240,018	122	0,082	407180,096	2,797	47600,000	466796,541	0,410
12	280	6+P	210,000	175,000	266,000	239,884	240,022	110	0,138	316701,128	4,506	42941,176	421109,089	0,295
13	315 S/M	2P	300,000	160,000	294,000	264,864	265,000	125	0,136	499513,232	4,321	48764,706	478218,404	0,222
14	315 S/M	4P	400,000	175,000	294,000	264,930	265,020	135	0,090	666067,908	2,794	52647,059	516291,281	0,277
15	315 S/M	6+P	300,000	197,500	294,000	264,921	265,013	142	0,092	499536,794	2,705	55364,706	542942,295	0,402
16	315 L	2P	560,000	160,000	294,000	264,918	265,005	148	0,087	932442,293	2,752	57694,118	565786,020	0,220
17	315 L	6+P	560,000	197,500	294,000	264,973	265,044	120	0,071	932580,104	2,087	46823,529	459181,966	0,236
18	315 L	6+P	560,000	197,500	294,000	264,938	265,018	132	0,079	932486,275	2,335	51482,353	504869,418	0,232
19	315 L	6+P	560,000	197,500	294,000	264,933	265,015	146	0,082	932477,478	2,409	56917,647	558171,445	0,248
20	315 L	6+P	480,000	197,500	294,000	264,915	265,028	140	0,113	799306,622	3,345	54588,235	535327,719	0,200
21	355 M/L	2P	560,000	175,000	335,000	299,899	300,038	138	0,139	#####	4,143	53811,765	527713,144	0,121
22	355 M/L	4P	530,000	197,500	335,000	299,853	299,995	142	0,143	999009,813	4,125	55364,706	542942,295	0,132
23	355 M/L	6+P	410,000	225,000	335,000	299,839	299,998	118	0,158	772825,353	4,324	46047,059	451567,391	0,135
24	355 A/B	2P	720,000	175,000	335,000	299,903	300,058	160	0,154	#####	4,589	62352,941	611473,472	0,098
25	355 A/B	4P	820,000	197,500	335,000	299,893	299,990	138	0,097	#####	2,795	53811,765	527713,144	0,122
26	355 A/B	6+P	770,000	225,000	335,000	299,895	300,039	173	0,144	#####	3,938	67400,000	660968,212	0,116

7.2 Amostras Análise MSA

7.2.1 Amostras MSA – Diâmetro Interno da Carcaça

DATA PLAN						
Fábrica	Operadores	Equipamentos	Peças Diferentes	Local de Medição	Nº de repetições	Y (ANSWER)
ST	Daniel	1	1	0º	1	379,97
ST	Daniel	1	1	0º	2	379,97
ST	Daniel	1	1	0º	3	379,96
ST	Daniel	1	1	90º	1	379,49
ST	Daniel	1	1	90º	2	379,49
ST	Daniel	1	1	90º	3	379,49
ST	Daniel	1	2	0º	1	379,87
ST	Daniel	1	2	0º	2	379,86
ST	Daniel	1	2	0º	3	379,86
ST	Daniel	1	2	90º	1	379,66
ST	Daniel	1	2	90º	2	379,65
ST	Daniel	1	2	90º	3	379,65
ST	Daniel	1	3	0º	1	379,93
ST	Daniel	1	3	0º	2	379,93
ST	Daniel	1	3	0º	3	379,93
ST	Daniel	1	3	90º	1	379,72
ST	Daniel	1	3	90º	2	379,71
ST	Daniel	1	3	90º	3	379,70
ST	Daniel	2	1	0º	1	379,98
ST	Daniel	2	1	0º	2	379,97
ST	Daniel	2	1	0º	3	379,99
ST	Daniel	2	1	90º	1	379,50
ST	Daniel	2	1	90º	2	379,50
ST	Daniel	2	1	90º	3	379,50
ST	Daniel	2	2	0º	1	379,89
ST	Daniel	2	2	0º	2	379,90
ST	Daniel	2	2	0º	3	379,89
ST	Daniel	2	2	90º	1	379,67
ST	Daniel	2	2	90º	2	379,67
ST	Daniel	2	2	90º	3	379,68
ST	Daniel	2	3	0º	1	379,93
ST	Daniel	2	3	0º	2	379,96
ST	Daniel	2	3	0º	3	379,94
ST	Daniel	2	3	90º	1	379,73
ST	Daniel	2	3	90º	2	379,73
ST	Daniel	2	3	90º	3	379,71
ST	Diogo	1	1	0º	1	379,98
ST	Diogo	1	1	0º	2	379,99
ST	Diogo	1	1	0º	3	379,98
ST	Diogo	1	1	90º	1	379,50
ST	Diogo	1	1	90º	2	379,50
ST	Diogo	1	1	90º	3	379,51
ST	Diogo	1	2	0º	1	379,85
ST	Diogo	1	2	0º	2	379,88
ST	Diogo	1	2	0º	3	379,86
ST	Diogo	1	2	90º	1	379,66
ST	Diogo	1	2	90º	2	379,67
ST	Diogo	1	2	90º	3	379,66
ST	Diogo	1	3	0º	1	379,93
ST	Diogo	1	3	0º	2	379,92
ST	Diogo	1	3	0º	3	379,93
ST	Diogo	1	3	90º	1	379,72
ST	Diogo	1	3	90º	2	379,70
ST	Diogo	1	3	90º	3	379,72

DATA PLAN						
Fábrica	Operadores	Equipamentos	Peças Diferentes	Local de Medição	Nº de repetições	Y (ANSWER)
ST	Diogo	2	1	0º	1	379,95
ST	Diogo	2	1	0º	2	379,99
ST	Diogo	2	1	0º	3	379,98
ST	Diogo	2	1	90º	1	379,51
ST	Diogo	2	1	90º	2	379,49
ST	Diogo	2	1	90º	3	379,51
ST	Diogo	2	2	0º	1	379,86
ST	Diogo	2	2	0º	2	379,88
ST	Diogo	2	2	0º	3	379,89
ST	Diogo	2	2	90º	1	379,66
ST	Diogo	2	2	90º	2	379,67
ST	Diogo	2	2	90º	3	379,66
ST	Diogo	2	3	0º	1	379,94
ST	Diogo	2	3	0º	2	379,95
ST	Diogo	2	3	0º	3	379,96
ST	Diogo	2	3	90º	1	379,73
ST	Diogo	2	3	90º	2	379,72
ST	Diogo	2	3	90º	3	379,73
ST	Rebello	1	1	0º	1	379,98
ST	Rebello	1	1	0º	2	379,96
ST	Rebello	1	1	0º	3	379,97
ST	Rebello	1	1	90º	1	379,50
ST	Rebello	1	1	90º	2	379,49
ST	Rebello	1	1	90º	3	379,49
ST	Rebello	1	2	0º	1	379,85
ST	Rebello	1	2	0º	2	379,86
ST	Rebello	1	2	0º	3	379,85
ST	Rebello	1	2	90º	1	379,65
ST	Rebello	1	2	90º	2	379,65
ST	Rebello	1	2	90º	3	379,65
ST	Rebello	1	3	0º	1	379,94
ST	Rebello	1	3	0º	2	379,93
ST	Rebello	1	3	0º	3	379,93
ST	Rebello	1	3	90º	1	379,70
ST	Rebello	1	3	90º	2	379,71
ST	Rebello	1	3	90º	3	379,72
ST	Rebello	2	1	0º	1	380,01
ST	Rebello	2	1	0º	2	379,99
ST	Rebello	2	1	0º	3	379,98
ST	Rebello	2	1	90º	1	379,51
ST	Rebello	2	1	90º	2	379,51
ST	Rebello	2	1	90º	3	379,52
ST	Rebello	2	2	0º	1	379,86
ST	Rebello	2	2	0º	2	379,88
ST	Rebello	2	2	0º	3	379,90
ST	Rebello	2	2	90º	1	379,66
ST	Rebello	2	2	90º	2	379,67
ST	Rebello	2	2	90º	3	379,66
ST	Rebello	2	3	0º	1	379,94
ST	Rebello	2	3	0º	2	379,93
ST	Rebello	2	3	0º	3	379,95
ST	Rebello	2	3	90º	1	379,72
ST	Rebello	2	3	90º	2	379,73
ST	Rebello	2	3	90º	3	379,71

7.2.2 Amostras MSA – Diâmetro Externo do Estator

DATA PLAN						
Fábrica	Operadores	Equipamentos	Peças diferentes	Local de medição	Nº de repetições	Y (ANSWER)
ST	Daniel	1	1	0º	1	380,147
ST	Daniel	1	1	0º	2	380,144
ST	Daniel	1	1	0º	3	380,142
ST	Daniel	1	1	90º	1	380,007
ST	Daniel	1	1	90º	2	380,002
ST	Daniel	1	1	90º	3	380,008
ST	Daniel	1	2	0º	1	380,042
ST	Daniel	1	2	0º	2	380,048
ST	Daniel	1	2	0º	3	380,045
ST	Daniel	1	2	90º	1	380,072
ST	Daniel	1	2	90º	2	380,070
ST	Daniel	1	2	90º	3	380,073
ST	Daniel	1	3	0º	1	380,028
ST	Daniel	1	3	0º	2	380,032
ST	Daniel	1	3	0º	3	380,035
ST	Daniel	1	3	90º	1	380,040
ST	Daniel	1	3	90º	2	380,045
ST	Daniel	1	3	90º	3	380,049
ST	Daniel	2	1	0º	1	380,145
ST	Daniel	2	1	0º	2	380,140
ST	Daniel	2	1	0º	3	380,145
ST	Daniel	2	1	90º	1	380,000
ST	Daniel	2	1	90º	2	379,995
ST	Daniel	2	1	90º	3	380,000
ST	Daniel	2	2	0º	1	380,045
ST	Daniel	2	2	0º	2	380,040
ST	Daniel	2	2	0º	3	380,045
ST	Daniel	2	2	90º	1	380,065
ST	Daniel	2	2	90º	2	380,070
ST	Daniel	2	2	90º	3	380,065
ST	Daniel	2	3	0º	1	380,020
ST	Daniel	2	3	0º	2	380,040
ST	Daniel	2	3	0º	3	380,035
ST	Daniel	2	3	90º	1	380,040
ST	Daniel	2	3	90º	2	380,040
ST	Daniel	2	3	90º	3	380,045
ST	Diogo	1	1	0º	1	380,128
ST	Diogo	1	1	0º	2	380,145
ST	Diogo	1	1	0º	3	380,146
ST	Diogo	1	1	90º	1	380,004
ST	Diogo	1	1	90º	2	380,005
ST	Diogo	1	1	90º	3	380,002
ST	Diogo	1	2	0º	1	380,021
ST	Diogo	1	2	0º	2	380,025
ST	Diogo	1	2	0º	3	380,028
ST	Diogo	1	2	90º	1	380,054
ST	Diogo	1	2	90º	2	380,061
ST	Diogo	1	2	90º	3	380,055
ST	Diogo	1	3	0º	1	380,025
ST	Diogo	1	3	0º	2	380,018
ST	Diogo	1	3	0º	3	380,024
ST	Diogo	1	3	90º	1	380,018
ST	Diogo	1	3	90º	2	380,022
ST	Diogo	1	3	90º	3	380,029

DATA PLAN						
Fábrica	Operadores	Equipamentos	Peças diferentes	Local de medição	Nº de repetições	Y (ANSWER)
ST	Diogo	2	1	0º	1	380,140
ST	Diogo	2	1	0º	2	380,130
ST	Diogo	2	1	0º	3	380,135
ST	Diogo	2	1	90º	1	379,990
ST	Diogo	2	1	90º	2	379,990
ST	Diogo	2	1	90º	3	379,990
ST	Diogo	2	2	0º	1	380,030
ST	Diogo	2	2	0º	2	380,040
ST	Diogo	2	2	0º	3	380,040
ST	Diogo	2	2	90º	1	380,070
ST	Diogo	2	2	90º	2	380,060
ST	Diogo	2	2	90º	3	380,060
ST	Diogo	2	3	0º	1	380,000
ST	Diogo	2	3	0º	2	380,010
ST	Diogo	2	3	0º	3	380,010
ST	Diogo	2	3	90º	1	380,030
ST	Diogo	2	3	90º	2	380,020
ST	Diogo	2	3	90º	3	380,020
ST	Rebello	1	1	0º	1	380,123
ST	Rebello	1	1	0º	2	380,127
ST	Rebello	1	1	0º	3	380,129
ST	Rebello	1	1	90º	1	380,000
ST	Rebello	1	1	90º	2	380,006
ST	Rebello	1	1	90º	3	380,003
ST	Rebello	1	2	0º	1	380,013
ST	Rebello	1	2	0º	2	380,015
ST	Rebello	1	2	0º	3	380,016
ST	Rebello	1	2	90º	1	380,048
ST	Rebello	1	2	90º	2	380,059
ST	Rebello	1	2	90º	3	380,050
ST	Rebello	1	3	0º	1	380,014
ST	Rebello	1	3	0º	2	380,013
ST	Rebello	1	3	0º	3	380,018
ST	Rebello	1	3	90º	1	380,055
ST	Rebello	1	3	90º	2	380,062
ST	Rebello	1	3	90º	3	380,060
ST	Rebello	2	1	0º	1	380,130
ST	Rebello	2	1	0º	2	380,140
ST	Rebello	2	1	0º	3	380,135
ST	Rebello	2	1	90º	1	379,980
ST	Rebello	2	1	90º	2	379,975
ST	Rebello	2	1	90º	3	379,970
ST	Rebello	2	2	0º	1	380,015
ST	Rebello	2	2	0º	2	380,025
ST	Rebello	2	2	0º	3	380,020
ST	Rebello	2	2	90º	1	380,050
ST	Rebello	2	2	90º	2	380,055
ST	Rebello	2	2	90º	3	380,050
ST	Rebello	2	3	0º	1	380,000
ST	Rebello	2	3	0º	2	379,995
ST	Rebello	2	3	0º	3	379,990
ST	Rebello	2	3	90º	1	380,025
ST	Rebello	2	3	90º	2	380,015
ST	Rebello	2	3	90º	3	380,025

7.2.3 Amostras MSA – Temperatura de Carcaças

DATA PLAN					
Fábrica	Operadores	Equipamentos	Peças diferentes	Nº de repetições	Y (ANSWER)
ST	1	1	1	1	65
ST	1	1	1	2	65
ST	1	1	1	3	65
ST	2	1	1	1	65
ST	2	1	1	2	65
ST	2	1	1	3	65
ST	1	2	1	1	65
ST	1	2	1	2	65
ST	1	2	1	3	65
ST	2	2	1	1	65
ST	2	2	1	2	65
ST	2	2	1	3	65
ST	1	1	2	1	66
ST	1	1	2	2	66
ST	1	1	2	3	65
ST	2	1	2	1	66
ST	2	1	2	2	66
ST	2	1	2	3	66
ST	1	2	2	1	65
ST	1	2	2	2	66
ST	1	2	2	3	66
ST	2	2	2	1	65
ST	2	2	2	2	65
ST	2	2	2	3	66
ST	1	1	3	1	64
ST	1	1	3	2	64
ST	1	1	3	3	64
ST	2	1	3	1	64
ST	2	1	3	2	64
ST	2	1	3	3	64
ST	1	2	3	1	64
ST	1	2	3	2	64
ST	1	2	3	3	64
ST	2	2	3	1	64
ST	2	2	3	2	64
ST	2	2	3	3	64

7.3 Dados Cálculo do Coeficiente de Atrito – Análise DOE

Nº Exp.	Tipo de Graxa	Posição	Quantidade Utilizada (Kg)	l (estator)	c	b	a	d	P_Final	δ	A lateral (mm ²)	p contacto (Mpa)	FA (kgf)	FA (N)	μ
1	Vaselina	1	0,003	280	130,000	212,500	189,823	190,02	126	0,201	334307,975	9,198	49153	482026	0,157
2	Vaselina	1	0,003	300	110,000	212,500	189,883	190,01	116	0,123	358152,558	5,891	45271	443953	0,210
3	Vaselina	2	0,003	210	110,000	212,500	189,950	190,02	107	0,074	250730,981	3,532	41776	409687	0,463
4	Vaselina	2	0,003	210	110,000	212,500	189,919	190,05	107	0,127	250759,569	6,041	41776	409687	0,270
5	Vaselina	3	0,008	210	110,000	212,500	189,878	190,04	110	0,161	250749,673	7,684	42941	421109	0,219
6	Vaselina	3	0,008	300	110,000	212,500	189,842	190,01	107	0,166	358155,700	7,936	41776	409687	0,144
7	G300	1	0,011	350	130,000	212,500	189,888	190,04	140	0,148	417908,792	6,737	54588	535328	0,190
8	G300	1	0,016	270	140,000	212,500	189,873	190,01	120	0,138	322347,198	6,104	46824	459182	0,233
9	G300	2	0,027	270	140,000	212,500	189,937	190	114	0,066	322331,647	2,898	44494	436338	0,467
10	G300	2	0,032	270	140,000	212,500	189,862	190,01	120	0,144	322337,302	6,364	46824	459182	0,224
11	G300	3	0,035	270	140,000	212,500	189,867	190	117	0,128	322318,924	5,664	45659	447760	0,245
12	G300	3	0,040	270	140,000	212,500	189,843	190	112	0,157	322328,820	6,958	43718	428724	0,191
13	G900	1	0,018	300	110,000	212,500	189,938	190	107	0,066	358147,846	3,137	41776	409687	0,365
14	G900	1	0,016	280	130,000	212,500	189,909	190,02	108	0,110	334299,178	5,020	42165	413495	0,246
15	G900	2	0,010	360	110,000	212,500	189,877	190	116	0,121	429764,220	5,774	45271	443953	0,179
16	G900	2	0,018	280	130,000	212,500	189,893	190,03	111	0,135	334313,839	6,165	43329	424916	0,206
17	G900	3	0,025	280	130,000	212,500	189,895	190,03	110	0,137	334321,169	6,240	42941	421109	0,202
18	G900	3	0,032	280	130,000	212,500	189,883	190,03	110	0,150	334322,635	6,853	42941	421109	0,184

7.4 Dados Cálculo do Coeficiente de Atrito – Validação da Análise DOE

Nº Exp.	Tipo de Graxa	Posição	Quantidade Utilizada (Kg)	l (estator)	c	b	a	d	P_Final	δ	A lateral (mm ²)	p contacto (Mpa)	FA (kgf)	FA (N)	μ
1	G900	3	0,042	280	130,000	212,500	189,948	190,010	112	0,062	334283,051	2,847	43717,64706	428723,6648	0,450
2	G900	3	0,037	280	130,000	212,500	189,928	190,012	110	0,084	334285,983	3,838	42941,17647	421109,0895	0,328
3	G900	3	0,030	280	130,000	212,500	189,898	190,013	110	0,116	334288,916	5,288	42941,17647	421109,0895	0,238

7.5 Dados Cálculo do Coeficiente de Atrito – Validação de Blocos nos Olhais

Situação	l (estator)	c	b	a	d	P Final	δ	A lateral (mm ²)	p contacto (MPa)	FA (kgf)	FA (N)	μ
SEM BLOCO	280,000	130,000	212,500	189,876	190,041	117,000	0,165	334337,296	7,540	45658,824	447760,103	0,178
SEM BLOCO	280,000	130,000	212,500	189,863	190,042	114,000	0,179	334338,762	8,192	44494,118	436338,240	0,159
SEM BLOCO	280,000	130,000	212,500	189,907	190,026	116,000	0,119	334310,907	5,439	45270,588	443952,815	0,244
COM BLOCO	280,000	130,000	212,500	189,909	190,033	115,000	0,124	334324,101	5,666	44882,353	440145,528	0,232
COM BLOCO	280,000	130,000	212,500	189,884	190,031	118,000	0,147	334319,703	6,700	46047,059	451567,391	0,202
COM BLOCO	280,000	130,000	212,500	189,881	190,024	111,000	0,143	334307,975	6,549	43329,412	424916,377	0,194

Item	Designação	Material	Norma	Quant.	Plano	Massa (kg)	Observações

<p>Cotas não tolerânciadas - Respeitar quando aplicável ao desenho</p> <p>ISO 2768-1 (MS) - Aplicável para Mecânica: MEDIO ±0.1, ATE ±0.3, MAUS DE 0.5</p> <p>ISO 2768-2 (MS) - Aplicável para Construção Soldada: +0.8, +0.6, +0.4, +0.3, +0.2, +0.1</p> <p>Considerar cadernos de encargos EDM 12.01.011</p>		<p>Aplicável a peças fundidas</p> <p>Aplicável para construção soldada</p>					
1000	2000	4000	8000	1000	2000	4000	8000

Rev	Data	Desenhou	Verificou	Alterações	Processo
				MODIFICAÇÕES	

Des.	Catarina N.	19/07/21		<p>TIPO DE MOTOR</p>	<p>WEGeuro - Indústria eléctrica, S.A. Rua Frederico Ulrich Sector V Apartado 6074-CP 4471 907 MAIA Portugal Contribuinte (VAT): PT 506 177 521</p>
Verif.	João C.	19/07/21			
Processo	<p>Proteção com Aro de Impregnar</p>			Rev.	
Escalas	1/5			Substitui:	
Norma				Substituído por:	

7.7 Dados Cálculo do Coeficiente de Atrito – Validação de Ferramenta Protetora de Resina

Tipo de Ferramenta	l (estator)	c	b	a	d	P_Final	δ	A lateral (mm ²)	p contacto (Mpa)	FA (kg)	FA (N)	μ
Com Aro	280,000	130,000	212,500	189,889	190,026	111	0,137	334310,907	6,242	43329,412	424916,377	0,204
Com Aro	250,000	130,000	212,500	189,893	190,022	124	0,129	298485,336	5,898	48376,471	474411,117	0,269
Com Aro												
Sem Aro	280,000	130,000	212,500	189,876	190,041	117	0,165	334337,296	7,540	45658,82353	447760,1031	0,177617
Sem Aro	280,000	130,000	212,500	189,863	190,042	114	0,179167	334338,762	8,192	44494,11765	436338,240	0,15931
Sem Aro	280,000	130,000	212,500	189,907	190,026	116	0,119167	334310,907	5,439	45270,58824	443952,8154	0,244176

7.8 Desenho da Ferramenta Atual

Dimensões em mm

SECCÃO A-A
ESCALA 1:5

SECCÃO B-B
ESCALA 1:2

SECCÃO C-C
ESCALA 1:2

NOTA 1:
Soldar cutelos ao aro interior

NOTA 2:
Tornear cutelos + aro interior

NOTA 3:
Soldar conjunto cutelos + aro interior ao tubo

Item	Designação	Material	Norma	Quant.	Plano	Massa (kg)	Observações
01	Ferramenta inserção estator em carcaça - ATUAL	St-37		01			

Corte por serrote

CUTELOS DE REFORÇO
Escala 1:2

CHAPA PLANIFICADA
Escala 1:10

1175 (∅Int planificado)

285

10

Eixo de Revolução

Rev. Data Desenhou Verificou Alterações MODIFICAÇÕES Processo

Des. C.Neves 10/08/21 TIPO DE MOTOR W22 - 250

Verif. Processo

Escalas 1:2 1:5 1:10 Norma Ind. Compl. Ferramenta de inserção de estator em carcaça - ATUAL

WEG Indústria elétrica, S.A. Rua Francisco de Sá e Botelho 11, Apartado 9576-OP-6471-937, Alameda Portugal, Contribuinte (IRS): PT 604 171 021

Rev. Substitui Substituído por

IMRA31115A

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA VIDA ÚTIL DE UMA FERRAMENTA UTILIZADA NUMA EMPRESA DE MOTORES ELÉTRICOS ATRAVÉS DA FILOSOFIA SIX SIGMA

7.9 Desenho da Ferramenta Futura

Dimensões em mm

SEÇÃO A-A
ESCALA 1:5

SEÇÃO B-B
ESCALA 1:2

NOTA 1:
Soldar cutelos ao aro interior

NOTA 2:
Tornear cutelos + aro interior

NOTA 3:
Soldar conjunto cutelos + aro interior ao tubo

Item	Designação	Material	Norma	Quant.	Plano	Massa (kg)	Observações
01	Ferramenta inserção estator em carcaça - FUTURA	AISI 1020		01			

Corte por serrote

CUTELOS DE REFORÇO
Escala 1:2

SEÇÃO C-C
ESCALA 1:2

NOTA 4: Obter perfil dos cutelos por oxicorte.

CHAPA PLANIFICADA
Escala 1:10

Eixo de Revolução

Rev	Data	Desenhou	Verificou	Alterações	Processo
MODIFICAÇÕES					
Des.	C.Neves	20/08/21		TIPO DE MOTOR	WEGeuro - Indústria eléctrica, S.A. Rua Frederico Ulrich Sector V Apartado 807a CP 4471 907 WAAA Portugal Contacto: (+351) 91 564 177 521
Verif.				W22 - 250	
Processo					Rev.
WEQ Escalas: 1:2, 1:5, 1:10 Ferramenta de inserção de estator em carcaça - FUTURA Norma: Ind. Compl.:					Substituído por:

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

IMRA31115A

AVALIAÇÃO DO AUMENTO DA VIDA ÚTIL DE UMA FERRAMENTA UTILIZADA NUMA EMPRESA DE MOTORES ELÉTRICOS ATRAVÉS DA FILOSOFIA SIX SIGMA

