



NOVA

NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

JOÃO PEDRO BENTO MARQUEZ

Licenciado em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

PREVISÃO E PADRONIZAÇÃO DE PROCESSOS DE
PRESS-FIT EM CONTADORES ATRAVÉS DE DESE-
NHO DE EXPERIÊNCIAS APLICADO NA INDÚSTRIA
AUTOMÓVEL

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e
Gestão Industrial

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA E GESTÃO INDUSTRIAL

Universidade NOVA de Lisboa

Março, 2022



PREVISÃO E PADRONIZAÇÃO DE PROCESSOS DE *PRESS-FIT* EM CONTADORES ATRAVÉS DE DESE- NHO DE EXPERIÊNCIAS APLICADO NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e
Gestão Industrial

JOÃO PEDRO BENTO MARQUEZ

Licenciado em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

Orientador: Doutor Radu Godina,
Professor Auxiliar Convocado, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientador: Mestre em Engenharia André Lopes
Gestor de Projeto, TE Connectivity Portugal

Júri:

Presidente: Doutora Alexandra Maria Baptista Ramos Tenera
Professora Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Vogais: Doutor Eduardo Manuel Godinho Rodrigues
Professor Auxiliar, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

Doutor Radu Godina,
Professor Auxiliar Convocado, Universidade NOVA de Lisboa

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA E GESTÃO INDUSTRIAL

Universidade NOVA de Lisboa
Março, 2022

Previsão e Padronização de Processos de *Press-fit* em Contatores através de Desenho de Experiências aplicado na Indústria Automóvel

Copyright © João Pedro Bento Marquez, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Radu Godina, na qualidade de orientador, por toda disponibilidade mostrada e todo o auxílio prestado ao longo do projeto, o que tornou possível a realização desta dissertação.

Agradecer também a toda a equipa do ME Projects, que sempre me acolheu da melhor forma, e em especial ao meu orientador na TE Connectivity Évora, o Engenheiro André Lopes, e à Engenheira Liliana Dias, cuja ajuda e transmissão de conhecimento representou um contributo fundamental para a conclusão desta dissertação.

A todos os que me acompanharam, apoiaram, e transformaram este percurso num conjunto de boas memórias, o meu mais sincero obrigado.

RESUMO

No enquadramento atual, caracterizado pela elevada competitividade entre organizações, é cada vez mais perceptível a realização de esforços por parte destas no que toca à implementação de metodologias e ferramentas que otimizem a sua proposta de valor. Num contexto onde os requisitos dos clientes são cada vez mais exigentes e heterogéneos, torna-se imperativo que as empresas tenham processos flexíveis, padronizados, e que assim lhes permitam responder de forma célere ao mercado, ganhando vantagem competitiva.

Neste âmbito, a presente dissertação apresenta um procedimento de padronização e previsão de processos *press-fit* na produção de contadores, destinados a veículos elétricos. Tem como objetivo a otimização e padronização de procedimentos de validação destes processos, nomeadamente no que diz respeito à definição dos seus limites de controlo. Ao serem definidos com base num só lote de componentes, a variabilidade entre lotes força uma revalidação, que garante a estabilidade do processo para novas condições de matéria-prima.

Tendo como objeto de estudo a variabilidade geométrica dos componentes, com base em vários lotes dos mesmos, é possível, através da aplicação de ferramentas como a Análise de Variância, identificar as variáveis significativas a nível dimensional. Depois, com este conhecimento, e recorrendo à ferramenta do Desenho de Experiências, é possível elaborar modelos que conseguem prever em antemão a magnitude e correspondente impacto da variabilidade dos componentes na estabilidade dos respetivos processos.

Ao modelar os processos com uso das tolerâncias dos *inputs*, é possível prever os seus *outputs*, garantindo a capacidade de ajustar atempadamente todos os limites de processo com base nos dados de vários lotes. Assim, otimizando o procedimento de validação, tornando-o independente de um só lote, é possível prever a tempo as alterações que devem ser realizadas nos limites de processo. Desde modo, é promovida a estabilidade dos processos e evita-se tanto situações de falta de qualidade, como desperdícios na forma de falsos alarmes.

Palavras-chave: Padronização, Previsão, *Press-fit*, Análise de Variância, Desenho de Experiências

ABSTRACT

Currently, the competitiveness among organizations has been increasing and the efforts made by these are increasingly noticeable regarding the implementation of tools and methodologies that optimize their value proposal.

In a context where customer requirements are increasingly demanding and heterogeneous, it is imperative for companies to have flexible, standardized processes that allow them to respond quickly to the market, thus gaining competitive advantage.

In this context, in this dissertation a procedure for standardization and prediction of *press-fit* processes in the manufacture of contactors for electric vehicles is presented. The objective is to optimize and standardize the validation procedures of these processes, namely regarding the definition of their control limits. Since they are currently defined based on a single batch of components, the variability between batches forces a revalidation, which ensures the stability of the process for the new raw material conditions.

By focusing on the geometric variability of these components, based on several batches, through the application of tools such as the Analysis of Variance it is possible to identify the significant variables at the dimensional level. Then, with this knowledge, and using the tool of Design of Experiments, it is possible to develop models that can predict in advance the magnitude and corresponding impact of component variability on the stability of the respective processes.

By modeling the processes using input tolerances, it is possible to predict their outputs, ensuring the ability to timely adjust all process limits based on multiple batch data. Thus, by optimizing the validation procedure to make it independent of a single batch, it is possible to predict in a timely manner the changes that need to be made to the process limits. In this way, process stability is promoted and both poor quality situations and waste in the form of false alarms are avoided.

Keywords: Standardization, Prediction, Press-fit, Analysis of Variance, Design of Experiments

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento e Motivação	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Metodologia de Investigação.....	5
1.4	Estrutura do Documento.....	8
2	REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1	Padronização de Processos	9
2.1.1	Origem e Valor Acrescentado	10
2.1.2	Estado da investigação e aplicação da metodologia	12
2.1.3	Relação com Parametrização e Especificação de Processos	15
2.1.4	Vantagens, Desvantagens e Barreiras	16
2.1.5	Adoção e Benefícios Adjacentes	18
2.2	Relés	19
2.2.1	Funcionamento	19
2.2.2	Tipos de Relés Automóveis	22
2.2.3	Influência e Tendências do Mercado Automóvel	25
2.2.4	Aplicações.....	26
2.2.5	Desafios Existentes	27
2.3	Processos de fabrico nos Relés.....	28
2.3.1	<i>Press-fit</i>	28

2.3.2	Estudo do Processo.....	30
2.4	Modelação Preditiva	31
2.4.1	Dados.....	33
2.4.2	Abordagem	33
2.4.3	Análise de Regressão.....	34
2.4.4	Futuro da Modelação Preditiva	34
3	MÉTODOS	35
3.1	A importância da Qualidade na Indústria Automóvel.....	35
3.1.1	Desenho de Experiências	37
3.1.2	Análise de Variância	40
4	ESTUDO DE CASO	49
4.1	Descrição da Unidade Industrial.....	49
4.2	Estratégia e Organização da Unidade.....	50
4.3	Sistema de Validação.....	52
4.4	Descrição do Caso e Identificação do Problema.....	53
4.5	Propostas de Melhoria.....	54
4.6	Análise do Produto - Contator EVC 175.....	56
4.7	Análise dos Processos	60
4.7.1	Funcionamento dos Processos	61
4.7.2	Requisitos e Controlos dos Processos	64
5	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	67
5.1	Caracterização dos Componentes.....	67
5.1.1	Revestimento das peças.....	69
5.1.2	Tensões internas e Coercitividade	71
5.1.3	Qualidade dos acabamentos da superfície	73
5.2	Recolha de dados e Metrologia.....	73
5.3	Identificação das Variáveis em Estudo.....	74

5.4	Definição e execução do plano experimental	76
5.5	Limitações e Pressupostos.....	77
6	DESCRIÇÃO DOS MODELOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	79
6.1	Análise de Dados.....	79
6.2	Análise dos Resultados	80
6.2.1	Análise de Variância	81
6.2.2	Desenho de Experiências	95
6.3	Validação e Discussão de Resultados.....	112
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	115
7.1	Conclusões gerais	115
7.2	Crítica aos resultados obtidos.....	116
7.3	Trabalhos e Passos Futuros	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Valor monetário do mercado de relés automóveis, por região, entre 2017 e 2027 (adaptado de [8])	3
Figura 1.2 - Fases do estudo de caso (adaptado de [23])	6
Figura 2.1 - Exemplo de um relé com os seus elementos integrantes	19
Figura 2.2 - Esquemática do funcionamento de um relé eletromecânico automóvel	22
Figura 2.3 - Principais componentes de um relé eletromecânico	22
Figura 2.4 - Ilustração de uma estação de <i>press-fit</i> (adaptado de [53])	30
Figura 3.1 - Entradas e saídas de um processo de produção (adaptado de [81])	36
Figura 3.2 - Esquema de abordagem no planeamento de DOE (adaptado de [79])	40
Figura 4.1 - Integração total das valências da TE Connectivity Évora	51
Figura 4.2 - 4 versões distintas do produto EVC (adaptado de [92])	56
Figura 4.3 - Esquemática macro de um exemplo de aplicação de um contator EVC 250 num veículo elétrico (adaptado de [92])	57
Figura 4.4 - Esquemática micro de um exemplo de aplicação de um contator EVC 250 num veículo elétrico (adaptado de [92])	57
Figura 4.5 - EVC 175 (adaptado de [93])	58
Figura 4.6 - Arco elétrico verificado durante a comutação do contator (abertura dos contactos, com fonte [92])	59
Figura 4.7 - Vista de core de um EVC 250 (carga e descarga) com alguns componentes identificados ([92])	59
Figura 4.8 - Vista de corte de um EVC 250 com alguns componentes identificados (adaptado de [92])	59
Figura 4.9 - Desenho e esquema com vista de corte lateral do Processo P06	61
Figura 4.10 - Desenho e esquema com vista de corte lateral do Processo P01/02	61

Figura 4.11 - Caracterização da curva força-deslocamento do P01/02 (definição de zonas, exemplo de janelas de controlo, ilustração de situações não conformes)	63
Figura 4.12 - Caracterização da curva de força-deslocamento do P06 (definição de zonas e exemplo de janelas de controlo)	64
Figura 5.1 - Plate (Processo P06)	68
Figura 5.2 - Core (Processo P06).....	68
Figura 5.3 - Frame (Processo P01/02).....	68
Figura 5.4 - Bushing (Processo P01/02)	69
Figura 5.5 - Planeamento para a recolha de dados.....	73
Figura 6.1 - Representação dos componentes utilizados, a) <i>Plate</i> , b) <i>Core</i> , c) <i>Bushing</i> , d) <i>Frame</i>	80
Figura 6.2 - Ilustração do resultado final do Processo P06, em duas vistas	82
Figura 6.3 - Ilustração do resultado final do processo P01/02, em duas vistas	82
Figura 6.4 - Gráficos de Resíduos para a Força de Retenção (Processo P06).....	83
Figura 6.5 - Verificação de Normalidade (Força de Retenção - P06).....	84
Figura 6.6 - Gráficos de Resíduos para a Planicidade da <i>Plate</i> (Processo P06)	85
Figura 6.7 - Verificação de Normalidade (Planicidade da <i>Plate</i> - P06)	86
Figura 6.8 - Gráfico de Box-Cox da resposta Planicidade da <i>Plate</i> (P06).....	87
Figura 6.9 - Gráficos de Resíduos para a Planicidade da <i>Plate</i> , Resposta Transformada (Processo P06).....	88
Figura 6.10 - Verificação de Normalidade (Planicidade da <i>Plate</i> , Resposta Transformada - P06)	88
Figura 6.11 - Gráficos de Resíduos para a Força de Retenção (Processo P01/02)	90
Figura 6.12 - Verificação de Normalidade (Força Retenção - P01/02).....	90
Figura 6.13 - Gráficos de Resíduos para o Valor na Linha de Controlo X (Processo P01/02) ...	92
Figura 6.14 - Verificação de Normalidade (Valor na Linha de Controlo X - P01/02).....	92
Figura 6.15 - Gráfico de Box-Cox da resposta Valor na Linha de Controlo X (P01/02)	93
Figura 6.16 - Gráficos de Resíduos para o Valor na Linha Controlo X, Resposta Transformada (Processo P01/02).....	94
Figura 6.17 - Verificação de Normalidade (Valor na Linha de Controlo X, Resposta Transformada - P01/02)	94
Figura 6.18 - Curva de Poder para a presente definição do DOE do Processo P06	97
Figura 6.19 - Curva de Poder para a presente definição do DOE do Processo P01/02	98
Figura 6.20 - <i>Plate</i> sujeita a maquinação, com a) vista diagonal, b) vista de topo	999

Figura 6.21 - <i>Plate</i> não sujeita a maquinação, com a) vista diagonal, b) vista de topo.....	100
Figura 6.22 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados (Valor na Linha de Controlo X, DOE - Processo P01/02)	104
Figura 6.23 - Verificação de Normalidade (Valor na Linha de Controlo X, DOE - P01/02)	104
Figura 6.24 - Gráficos de Resíduos para a Valor na Linha Controlo X (DOE, Processo P01/02)	105
Figura 6.25 - Gráfico Fatorial de Efeitos para Valor na Linha de Controlo X (DOE - Processo P01/02)	105
Figura 6.26 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados (Valor na Linha de Controlo X, DOE - Processo P06)	108
Figura 6.27 - Verificação de Normalidade (Valor na Linha de Controlo X, DOE - P06)	108
Figura 6.28 - Gráficos de Resíduos para a Valor na Linha Controlo X (DOE, Processo P06)...	109
Figura 6.29 - Gráfico Fatorial de Efeitos para Valor na Linha de Controlo X (DOE - Processo P06)	109
Figura 6.30 - Comparação entre valor obtido na montagem versus valor previsto pelo modelo (Processo P06)	111
Figura 6.31 - Comparação entre valor obtido na montagem versus valor previsto pelo modelo (Processo P01/02)	111
Figura 6.32 - Ilustração do EVC 250	112
Figura 6.33 - Componentes dos Processos P06 e P01/02 (EVC 250). a) vista superior, b) vista inferior	113
Figura 6.34 - Gráfico de linha ajustada entre <i>output</i> e Diâmetro da <i>Frame</i>	113
Figura 6.35 - Gráfico de linha ajustada entre <i>output</i> e Diâmetro do <i>Bushing</i>	114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Aplicações de relés para automóveis por tipo de circuito elétrico.....	25
Tabela 3.1 - Planeamento dos dados para ANOVA com um fator a vários níveis (adaptado de [79]).....	41
Tabela 3.2 - Tabela ANOVA para um fator a vários níveis (adaptado de [79])	42
Tabela 3.3 - Planeamento dos dados para ANOVA com dois fatores a vários níveis (adaptado de [79]).....	45
Tabela 3.4 - Tabela ANOVA para dois fatores a vários níveis (adaptado de [79]).....	45
Tabela 4.1 - Definição das retas de controlo das curvas de força-deslocamento.....	65
Tabela 4.2 - Controlos periódicos realizados ao Processo P06	65
Tabela 4.3 - Controlos periódicos realizados ao Processo P01/02.....	66
Tabela 5.1 - Material e respetivo revestimento aplicado a cada uma das peças.....	70
Tabela 5.2 - Material de revestimento e respetivos usos e vantagens	70
Tabela 5.3 - Cálculo das interferências entre componentes nos processos	71
Tabela 5.4 - Especificação de força de campo coercitivo das peças	72
Tabela 5.5 - Motivo de seleção das variáveis a estudar do Processo P06.....	75
Tabela 5.6 - Motivo de seleção das variáveis a estudar do Processo P01/02	75
Tabela 6.1 - Nomenclatura das variáveis de entrada, por processo	80
Tabela 6.2 - Respostas selecionadas para a Análise de Regressão e Variância.....	81
Tabela 6.3 - ANOVA condensada para a Força de Retenção (Processo P06).....	83
Tabela 6.4 - ANOVA condensada para a Planicidade da <i>Plate</i> (Processo P06).....	85
Tabela 6.5 - ANOVA condensada para a Planicidade da <i>Plate</i> , Resposta Transformada (Processo P06).....	87
Tabela 6.6 - ANOVA condensada para a Força de Retenção (Processo P01/02).....	89
Tabela 6.7 - ANOVA condensada para o Valor de Controlo na Linha X (Processo P01/02).....	91

Tabela 6.8 - ANOVA condensada para a Valor na Linha de Controlo X, Resposta Transformada (Processo P01/02).....	93
Tabela 6.9 - Testes de Poder e Tamanho de Amostra para definição de nº de réplicas.....	97
Tabela 6.10 - Ordem de execução dos DOE para ambos os processos	100
Tabela 6.11 - Sumário do Modelo de Regressão Fatorial obtido com todos os DOE realizados	101
Tabela 6.12 - Tabela de Coeficientes Codificados (DOE Processo P01/02).....	102
Tabela 6.13 - ANOVA do Valor na Linha de Controlo X (DOE Processo P01/02)	103
Tabela 6.14 - Tabela de Coeficientes Codificados (DOE Processo P06)	106
Tabela 6.15 - ANOVA do Valor na Linha de Controlo X (DOE Processo P06)	107
Tabela 6.16 - Sumário e comparação dos modelos obtidos	110

GLOSSÁRIO

- Bushing*** Componente metálico de um contator responsável por guiar o campo magnético para dentro do mesmo e guiar o movimento de outros componentes.
- Core*** Componente metálico de um contator, ferromagnético, que é responsável por atrair outros componentes através de força magnética gerada pelo solenoide criado. Também designado por Núcleo.
- Frame*** Componente metálico de um contator responsável por ajudar a concentrar o campo eletromagnético, tornando-o mais forte e estável. Também designado por Carcaça.
- Plate*** Componente metálico de um contator responsável por ajudar a fechar o campo eletromagnético no circuito de bobina do contator, tornando-o mais forte e estável.
- Stepwise*** Ferramenta de regressão que realiza a seleção de variáveis úteis, adicionando ou excluindo preditores do modelo existente com base no teste de Fisher.

SIGLAS E ACRÓNIMOS

AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
EMAS	<i>Eco-Management and Audit Scheme</i>
EN	<i>European Norm</i>
EVC	<i>Electric Vehicle Contactor</i>
FC	Fator de Correção
IATF	<i>International Automotive Task Force</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LIC	Limite Inferior de Controlo
LIE	Limite Inferior de Especificação
LSE	Limite Superior de Especificação
LSC	Limite Superior de Controlo
MSA	<i>Measurement System Analysis</i>
MS	<i>Mean Squares</i>
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i>
SS	<i>Sum of Squares</i>

SÍMBOLOS

σ_m	Desvio padrão da máquina
σ_p	Desvio padrão do processo
σ^2	Variância
N	Dimensão da amostra
$g.l.$	Graus de liberdade
H_1	Hipótese alternativa
H_0	Hipótese nula
C_{mk}	Índice de capacidade da máquina
C_{pk}	Índice de capacidade do processo
α	Nível de significância (erro do tipo I)
N	Número de dados ou observações
F_0	Valor da estatística amostral de Fisher

INTRODUÇÃO

O primeiro capítulo da presente dissertação tem como objetivo contextualizar todo o projeto e identificar as motivações que levaram ao desenvolvimento do respetivo tema e os objetivos do estudo, bem como apresentar a metodologia e estrutura que serve por base a todo o presente documento.

1.1 Enquadramento e Motivação

Nesta era de globalização, o aumento da competitividade que se verifica nos mercados globais está a forçar cada vez mais uma postura agressiva por parte das organizações, num contexto onde os requisitos dos clientes passam a ser cada vez mais e com um maior nível de complexidade associada. Esta competitividade acaba por colocar um grande desafio às empresas, uma vez que se torna imperativo trabalhar na implementação de métodos e ferramentas que garantam o cumprimento destes requisitos e confirmem qualidade aos seus produtos, ao mesmo tempo que é reduzido o desperdício e o custo associado à sua produção, ganhando assim margem em relação aos concorrentes, proporcionando ao cliente uma excelente proposta de valor [1], [2].

Com vista a agilizar a resolução destes problemas, a Padronização de Processos e Metodologias permite contribuir para uma melhoria contínua, onde se procura otimizar todos os processos e minimizar potenciais erros associados. É possível, assim, promover a satisfação dos clientes através da utilização de processos estáveis, com pouca variabilidade, que culminam na execução de produtos que cumprem com os padrões de qualidade e especificações impostas pelos clientes [3]–[7].

Como exemplo de uma indústria onde a aplicação destes conceitos torna-se uma estratégia diferenciadora, tem-se a indústria automóvel, uma área considerada uma referência no que diz respeito a requisitos de qualidade [7]. Atualmente, trata-se de uma indústria que passa por uma fase bastante dinâmica, onde as condições de mercado estão em constante

mudança dado o enorme investimento na sustentabilidade e a crescente aposta nos veículos elétricos, criando aumentos de procura sem precedentes [8], [9].

A indústria automóvel pertence maioritariamente ao setor do fabrico, um setor com bastante peso na economia global. A nível europeu, o subsector correspondente ao fabrico de veículos a motor, reboques e semirreboques e o subsector do fabrico de componentes elétricos, ocupam, respetivamente, o primeiro e sexto lugar, a nível de valor acrescentado produzido [10]. Tratam-se de dois setores que presenciam atualmente um crescimento muito elevado, muito devido à crescente popularidade dos veículos elétricos, um mercado que se estima que quadruplique o seu valor entre 2020 e 2026, atingindo a marca de 725 mil milhões de dólares americanos, estimando-se que até ao ano de 2030 a frota global de veículos elétricos seja composta por 115 milhões de veículos elétricos, constituindo um aumento bastante significativo face às 8,5 milhões de unidades existentes em 2020 [11], [12].

Este aumento vem trazer a necessidade de conectividade e automação nos veículos, pelo que é assim expectável que a produção de componentes eletrónicos destinados a automóveis expanda nas mesmas proporções, continuando um crescimento que se alonga já por algumas décadas, com os componentes eletrónicos a passar a constituir em média cerca de 10% do preço total dos carros, em 1980, para cerca de 35% em 2010. Adicionalmente, é expectável que este valor aumente para cerca de 50% já em 2030 [13].

Nesta senda pela conectividade a nível de soluções de transporte, é necessário passar a produzir ainda em maior escala produtos como os relés, terminais, conetores e outros componentes que tornam possível a transmissão de sinais, energia, e dados em inúmeras aplicações. Apesar de todos estes componentes se encontrarem em clara expansão, é possível verificar uma extraordinária ascensão daquilo que é a procura por relés e contadores¹ no mercado. Várias previsões apontam para que o valor global do mercado de relés para automóveis registre um crescimento estável, com a Ásia e Oceânia a dominar, como se pode verificar na figura 1.1. A procura fica ainda caracterizada por relés altamente eficazes e eficientes, com dimensões otimizadas e um claro foco na segurança dos veículos, e com especificações cada vez mais exigentes a nível de capacidade de corrente suportada, devido à evolução das baterias [9], [14]–[16].

Para além disto, é previsto que a procura por relés para automóveis acompanhe este crescimento e atinja as 5,17 mil milhões unidades em 2025, com a Europa a dominar no que toca a relés de alta tensão (entre eles os contadores), acarretando uma fatia de 47% do mercado, prevista para 2027 [8], [14].

¹ Tal como os relés, os contadores são dispositivos eletromecânicos de comutação, funcionando sobre o mesmo princípio físico, sendo que o termo relé é amplamente utilizado para dispositivos de baixa e média potência, e o termo contator é mais comum na área de alta potência.

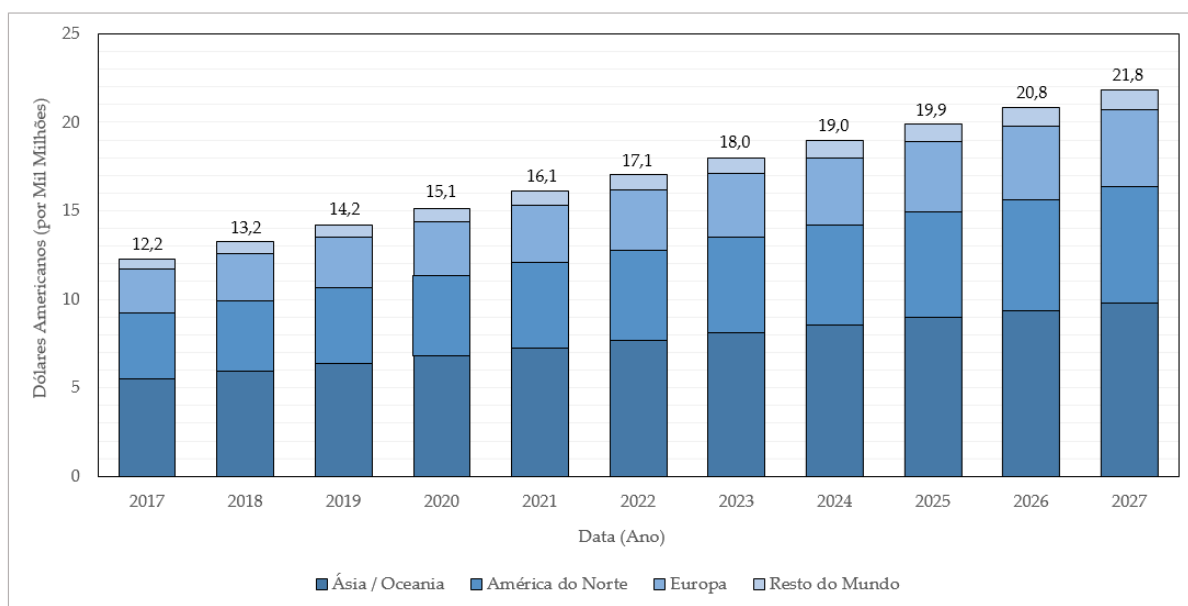


Figura 1.1 - Valor monetário do mercado de relés automóveis, por região, entre 2017 e 2027 (adaptado de [8])

Dado este crescimento que se verifica na produção de relés e contadores, é muito importante trabalhar no sentido da padronização de tudo o que envolve a sua produção, até porque as empresas do meio identificam a falta de padronização como um fator limitante ao crescimento deste mercado [8], [17].

Ao trabalhar neste sentido da padronização, as empresas conseguem obter vantagens competitivas. Sendo a procura caracterizada por inúmeras variantes distintas entre si (mediante a aplicação), ao implementar processos de produção flexíveis, as empresas conseguem assim responder de forma rápida ao mercado. No entanto, a tendência indica que cada vez mais a diversidade nos produtos e respetivos equipamentos, a evolução tecnológica e as novas funcionalidades requisitadas pelos clientes vão tornar estes produtos bastante desafiantes para as empresas, forçando a inovação [14].

Neste contexto, surge a TE Connectivity Évora, uma fábrica inserida na indústria automóvel que produz componentes eletrónicos, principalmente relés, contadores e conetores para aplicações automotivas, nomeadamente de segurança automóvel. A visão da empresa passa por fornecer soluções rápidas e fiáveis para uma mobilidade sustentável, tendo como missão fornecer uma experiência extraordinária aos seus clientes, aumentando a sua flexibilidade através do desenvolvimento contínuo da organização. Posto isto, dada a intenção da empresa em investir na padronização dos seus processos e das metodologias associadas aos mesmos, o presente estudo visa aplicar conhecimentos de Qualidade tais como a Análise de Variância (ANOVA) e o Desenho de Experiências (DOE), permitindo assim uma caracterização dos processos alvo, naquilo que é o fabrico de um produto bastante dinâmico, com montagens que podem englobar dezenas de peças, constituídas por diferentes materiais como

metais e polímeros, passando por dezenas de processos, diversos, tais como enrolamento, soldagem, inserção, *press-fit*, cunhagem, estampagem, limpeza, colagem, marcação, entre outros, sempre sujeitos a vários e rígidos requisitos de qualidade.

Pretende-se assim com o presente estudo contribuir para este objetivo ao caracterizar, otimizar e modelar processos, ao melhorar metodologias, e reduzir o desperdício e tempo associado ao desenvolvimento e à parametrização de equipamentos e processos.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal a otimização e padronização das validações de processos, dos procedimentos de desenvolvimento e parametrização dos mesmos, com finalidade de obtenção de um modelo que caracterize cada grupo de processos. Para isso, são estudados, caracterizados e modelados dois processos constituintes da produção de um contator.

O produto em causa é um dos mais importantes da empresa, um produto bastante complexo, o EVC (*Electric Vehicle Contactor*). Por se tratar de um produto destinado ao mercado dos veículos elétricos, que apresenta um elevado crescimento, este regista um grande volume de negócios a nível global. Consequentemente, cria-se a necessidade de uma maior capacidade de produção destes produtos, pelo que é necessário a criação de mais linhas de produção, para responder não só às quantidades exigidas como às inúmeras variantes requisitadas, que acabam por possuir cada vez mais um menor ciclo de vida. Isto, aliado ao facto de se tratar de um mercado recente e ainda numa fase de posicionamento, torna a produção destes produtos muito desafiante e complexa, o que promove variabilidade na cadeia de valor.

Por estas razões, o produto em questão dispõe de várias linhas de produção, constituídas por dezenas de processos (manuais, semiautomáticos e automáticos), encontrando-se neste momento numa profunda fase de transformação, uma vez que decorre a transição de linhas manuais para linhas automáticas, com a finalidade de dar resposta ao aumento de procura que incita à necessidade de um tempo de ciclo menor.

Deste modo, é realizada uma análise em relação ao impacto da variabilidade na implementação da padronização dentro destes processos. Apesar da metodologia de validação e parametrização de um processo se encontrar já definida, existe preocupações em relação à sua robustez, na medida em que apesar de um processo se encontrar validado de acordo com determinado lote de componentes disponível à data, a variabilidade associada entre lotes futuros provoca a impossibilidade de utilização dos parâmetros validados para outros lotes que difiram do original. Isto, uma vez que as condições de processo alteraram e corre-se o risco de não controlar o mesmo de maneira rigorosa e consequentemente incorrer em

custos de qualidade. Em adição a este risco associado, acresce ainda a necessidade de uma constante revalidação dos processos, consumindo tempo e recursos.

Apesar de uma melhoria dos processos à jusante, ao requisitar aos fornecedores peças com menor variabilidade, poder constituir grande parte da solução deste problema, trata-se de algo bastante dispendioso, devido ao rigor dimensional que seria exigido em relação aos requisitos do produto. Por isso, a primeira abordagem para a resolução deste problema passa pela melhoria dos processos em si, otimizando-os para que estes consigam absorver a variabilidade dos componentes.

Deste modo, é necessário avaliar as causas raiz desta variabilidade, e eliminar a dependência desta metodologia a um único lote, promovendo a estabilidade dos processos. Dentro deste produto, é realizada uma análise com foco naquele que é um dos processos mais comuns, o *press-fit*, com o objetivo de aumentar a robustez dos processos de validação e otimizar o processo de parametrização deste grupo de processos. São analisados dois *press-fit* relativos a um produto, de modo a relacionar pontos comuns em processos que são muito semelhantes. Depois, dado que esta família de produtos tem duas variantes principais, é analisado um *press-fit* análogo aos estudados, mas na outra variante do produto, de modo a obter uma validação da modelação feita para a variante inicial.

Com este trabalho, é também possível reduzir o desperdício e o tempo associado à parametrização dos processos e respetivos equipamentos. Para além disso, este estudo visa a modelação dos processos com base na experimentação feita, o que decorre da necessidade de conhecimento intrínseco do comportamento desses processos. Com base na informação recolhida, é explorado um modelo preditivo simples para quantificar o impacto da variabilidade no *output* do processo, sempre na ótica da padronização.

1.3 Metodologia de Investigação

A metodologia pode ser definida como a estratégia, plano de ação ou processo responsável pela escolha e utilização de métodos específicos e respetiva associação dos mesmos aos resultados desejados. Trata-se assim de um enquadramento geral que comporta estruturas e conceitos que fornecem o racional por detrás dos métodos e da forma como estes são aplicados [18].

Para o desenvolvimento deste projeto a metodologia de investigação utilizada foi a de estudo de caso. Um estudo de caso é uma abordagem de investigação científica que permite uma análise profunda e diversificada de tópicos complexos nos seus contextos reais [19]. Trata-se de uma estratégia que envolve uma investigação empírica que procura usar múltiplas fontes de evidência [20].

Os estudos de caso, considerados uma metodologia muito válida entre a comunidade científica, têm sido usados em inúmeras áreas, tanto para trabalhar e desenvolver teorias existentes, como para produzir novas teorias, ou simplesmente para explicar uma situação ou evento, tal como este aconteceu [21].

Consiste numa estratégia de investigação bastante usada e permite não só descrever os eventos do mundo real como fazer a análise e estudo de questões e temáticas bastante complexas, sempre com grande ênfase naquilo que é um conjunto de decisões e as respetivas respostas às perguntas “porquê?”, “como?” e “com que resultado?” associadas [22].

Deste modo, sendo uma metodologia que se revela bastante útil aquando da necessidade de estudar um contexto real de um sistema definido que está diretamente dependente da sua configuração intrínseca, a condução do presente estudo de caso passará pelas fases descritas na figura 1.2 [22].

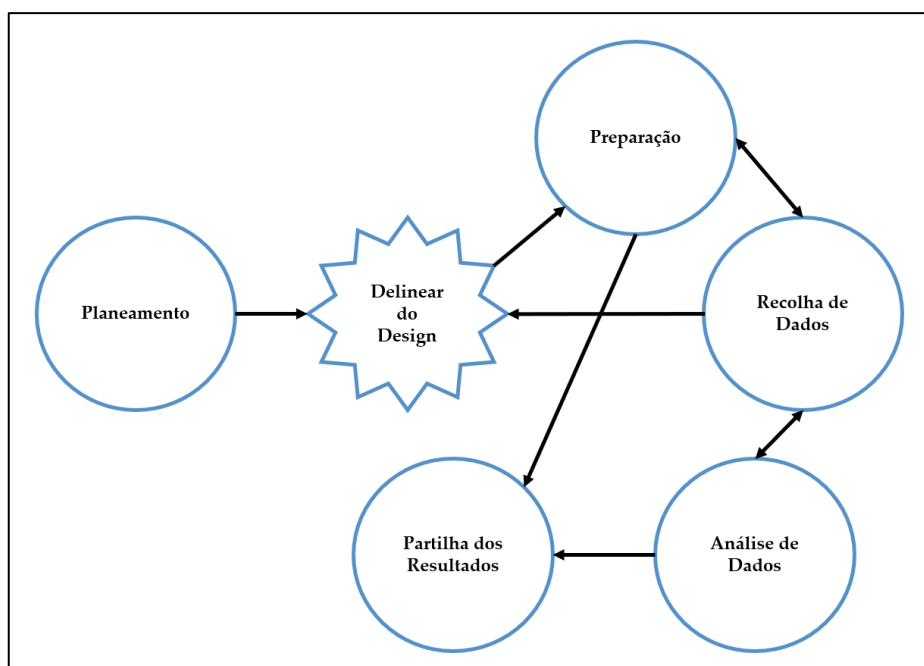


Figura 1.2 - Fases do estudo de caso (adaptado de [23])

Na fase 1, de planeamento, o objetivo do trabalho realizado nesta fase passa por uma predefinição do estudo de caso, com base numa análise do estado atual da investigação acerca das temáticas de relevo para a presente dissertação. São também exploradas aplicações práticas destas temáticas, através da leitura e revisão de artigos científicos que tenham sido publicados, sempre que possível, do ano de 2010 até ao presente, numa tentativa de foco na informação relevante relativa aproximadamente à última década de investigação. Fase muito relevante, na medida em que o estudo de caso beneficia bastante de desenvolvimentos teóricos prévios que ajudam a guiar as seguintes fases [23].

Na segunda fase, o delinear do design, pretende-se selecionar e definir o estudo de caso, sendo que no caso de a literatura se mostrar totalmente adequada, não é necessário desviar muito da pré definição realizada anteriormente. São tomadas decisões ponderadas e analisadas ao detalhe, desenvolvendo em paralelo proposições e problemáticas em relação ao estudo de caso, que estimulem a procura por soluções e conclusões [23].

A terceira fase, de preparação, constitui uma fase intermédia onde se pretende agregar o máximo possível de conhecimento em relação ao estudo de caso. É também realizada uma caracterização das envolventes e também realizada uma reflexão acerca de todas as propostas de melhoria em questão. Por se tratar de uma estratégia abrangente de pesquisa, um estudo de caso requer estes esforços a nível de planeamento [23].

Em seguida, na quarta fase, é feita uma recolha de dados. Esta fase tem por base o facto do estudo de caso conseguir explicar o processo e o resultado de um fenómeno por meios reais de experimentação, que consistem na observação, controlo e análises completas dos casos em si, que sob determinado contexto específico produzem os dados que sustentam as futuras conclusões. Com vista a compreender totalmente o caso em si, a condução deste estudo vai envolver a recolha de inúmeros dados, de modo a garantir também múltiplas fontes de evidência [19], [23].

Na quinta fase, é feita uma análise e interpretação cuidada dos dados recolhidos, utilizando ferramentas e conceitos teóricos oriundos da Fase 1, que permitem da melhor forma concluir acerca dos resultados. É ainda feita uma validação, onde se verifica que a metodologia foi validada, demonstrando confiabilidade na investigação realizada e reduzindo o risco de apresentar resultados errôneos, que podem induzir em conclusões totalmente díspares da realidade [19].

Por último, a sexta fase consiste na escrita do relatório e consequente partilha dos resultados obtidos. Trata-se de uma fase importante na medida em que os resultados se revelam bastante úteis naquilo que é o refinamento da teoria envolvente e o desenvolvimento de novas ideias. Deste modo, é importante que estas investigações sirvam de fonte de inspiração, pelo que as recomendações futuras também devem estar presentes e bem detalhadas [21].

1.4 Estrutura do Documento

O conteúdo da presente dissertação está dividido em seis capítulos, sendo que os apêndices associados ao trabalho realizado se encontram no final deste mesmo documento. Desse modo, é possível apresentar o desenrolar do projeto de uma forma organizada. Apresentam-se em seguida os tópicos fundamentais abordados em cada um dos capítulos da presente dissertação. Ao longo do capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica dos principais fundamentos e desenvolvimentos associados às matérias relevantes para a elaboração do presente estudo. É dada ênfase à Padronização de Processos, aos Relés e respectivos processos de *press-fit* e são também apresentados alguns desenvolvimentos científicos acerca de Modelação Preditiva. No capítulo 3, métodos, é realizada uma exposição do conceito de Qualidade e de respetivas técnicas e ferramentas, tais como a Análise de Variância e o Desenho de Experiências. No capítulo 4 é realizada toda uma caracterização detalhada acerca do estudo de caso em causa, começando por uma descrição da unidade industrial e uma contextualização acerca do sistema de validação de processos em uso. Depois, é feita de uma forma pormenorizada a identificação do problema, e seguinte análise dos processos estudados e propostas de melhoria a implementar. No capítulo 5, onde é abordado o procedimento experimental, faz-se um estudo detalhado acerca dos componentes envolvidos no processo e é realizada toda uma caracterização prática dos mesmos, através de um estudo de variabilidade e análise dos respetivos impactos no processo associados à variabilidade geométrica do *input*, tendo por base uma avaliação prévia das cotas mais relevantes a nível de impacto no processo. São ainda discutidas algumas limitações e pressupostos considerados. Já no capítulo 6, é feito um tratamento dos dados obtidos no capítulo anterior, com os componentes caracterizados a serem submetidos à produção de amostras dos respetivos processos, fazendo utilização de ferramentas da qualidade como a ANOVA e o DOE, com base sempre em controlo de curvas força-deslocamento em tempo real e outros controlos de qualidade. As ferramentas utilizadas permitem uma análise onde são discutidos e interpretados todos os resultados obtidos. Adicionalmente, os resultados obtidos são validados noutra versão do produto. Por último, no capítulo 7, são feitas conclusões e críticas globais acerca do estudo realizado, dando resposta aos objetivos que foram propostos à presente dissertação. São ainda sugeridos alguns trabalhos e passos futuros que podem servir de complemento e acrescentar bastante valor ao trabalho desenvolvido.

REVISÃO DE LITERATURA

Ao longo deste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica dos principais fundamentos e desenvolvimentos associados às matérias relevantes para a elaboração do presente estudo, de modo a suportar todo o desenrolar desta dissertação, que é sustentada nos respetivos dados, análises e conclusões originais.

É feita uma sintetização e categorização de toda a informação recolhida, a qual é inserida neste capítulo de uma forma estruturada, dividida em secções. O item 2.1 aborda o impacto da Padronização de Processos na melhoria das organizações, avaliando os benefícios e as desvantagens que podem advir da aplicação desta metodologia nos mais variados setores. Depois de estudar a metodologia em causa, é feito um estudo no item 2.2 acerca do setor de produtos em causa. Os respetivos processos dos produtos em questão, que sustentam este documento, são abordados no item 2.3, onde se procura obter uma visão global acerca dos mesmos. Por fim, é analisado e discutido no item 2.4 as contribuições que o tipo de desenvolvimentos a que esta dissertação se propõe a realizar podem ter quando aliados a abordagens relacionadas com a Modelação Preditiva, na medida em que é evidenciado a forma como este tópico e as conclusões que dele advém podem servir de base e/ou serem extrapoladas para investigações futuras.

2.1 Padronização de Processos

A melhoria contínua das propostas de valor das empresas é cada vez mais uma atividade chave para o sucesso, é possível verificar que a elevada proeminência da globalização ao longo dos últimos anos levou este conceito para níveis ainda mais relevantes. Em paralelo, os desenvolvimentos tecnológicos verificados nas últimas décadas vieram aumentar a eficiência de muitos processos, tanto produtivos como de negócio, sendo que, em contrapartida, os tornaram mais complexos, e por isso, mais difíceis de gerir operacionalmente [1], [23], [24].

Uma grande área de estudo que vem ao encontro desta dimensão e que tem vindo a ser bastante explorada pela comunidade científica tem a ver com a padronização, nomeadamente a padronização de processos, que procura não só potenciar a melhoria contínua, como melhorar estabilidade dos processos e agilizar a gestão operacional integrada [5]. Com este nível de controlo maior sobre os processos, as empresas ficam assim mais aptas a satisfazer os seus clientes, enquanto que conseguem também efetuar reduções de custos operacionais [24].

Com base nesta linha de pensamento, é possível verificar que a padronização de processos, uma função que tem como objetivo normalizar e organizar fluxos de trabalho, se tem vindo a tornar rapidamente numa metodologia largamente adotada em variadíssimas indústrias, sendo possível confirmar que, apesar de se poder revelar um método moroso e de meticulosa gestão dos recursos, resulta numa melhoria significativa dos processos, minimizando erros e potenciando a identificação de oportunidades de melhoria em várias áreas nas organizações [25]–[28].

Em seguida é realizada uma análise do estado de investigação relacionada com a Padronização de Processos. Pretende-se identificar a evolução e a direção do interesse académico acerca deste tema nos últimos anos e estudar todos os avanços e inovações que têm vindo a ser realizados no âmbito da Padronização de Processos. Ambiciona-se analisar e avaliar investigações que permitam inferir acerca do impacto que esta metodologia tem nas organizações de vários setores, fazendo uma reflexão sobre este impacto no aumento de competitividade das organizações em questão.

2.1.1 Origem e Valor Acrescentado

Na era da globalização, o aumento da competitividade tornou-se uma prioridade para a maioria das empresas, sendo que uma das principais formas de atingir tal feito passa pela realização de uma gestão e padronização global e interna dos processos envolventes das organizações [1].

Para atingir uma padronização nesses modos, é necessário fundamentar e ter por base as origens de tais metodologias. Segundo Taiichi Ohno, "*Where there is no standard, there can be no kaizen*"¹. Esta visão, acaba por estar presente em inúmeras filosofias, nomeadamente a do Pensamento *Lean*, onde existe uma tentativa de aglomeração de práticas de melhoria contínua do processo, através da eliminação de desperdícios relativos às atividades que se considera não agregarem valor [2].

Deste modo, ao eliminar desperdícios ao longo de toda a cadeia de valor, é possível adicionar valor não só aos processos, como ao produto final resultante destes, aumentando a produtividade e qualidade de produção associada [1].

¹ Onde não há padrão, não pode haver melhoria

Com uma inspiração baseada na "*Toyota Production System House*", encontra-se também na base da filosofia de Pensamento *Lean* e *Kaizen*, a Metodologia de Trabalho Padronizado. Segundo esta filosofia, é possível criar e documentar um padrão de trabalho juntamente com as pessoas que o utilizam, devendo existir diretrizes e orientações adaptadas ao propósito em questão. Na aplicação desta metodologia, deve-se procurar padronizar as atividades que dizem respeito ao operador ou técnico, aplicando aquilo que devem ser as melhores e mais eficientes práticas de execução para a tarefa em questão [2], [4], [5].

Assim, ao diminuir a variabilidade associada à decisão do trabalhador sobre como executa as suas tarefas, ou seja, sobre o seu método de trabalho, aumenta-se a probabilidade de garantir a sua reprodutibilidade. Esta variabilidade, que pode estar associada a fatores como a mão de obra, os métodos utilizados, as matérias ou até as máquinas, acaba por consistir numa condição natural que está sempre presente, sendo que representa algo que é ligeiramente diferente da forma habitual de comportamento. Com esta diminuição de variabilidade ciclo após ciclo, tornam-se mais eficazes as possíveis ligações causa-efeito no âmbito de deteção de desvios face aos padrões impostos, na medida em que os resultados obtidos são mais consistentes dada a reduzida variabilidade, sendo expectável *outputs* aproximadamente uniformes do ciclo de trabalho [4], [5].

Nesta linha de pensamento, o Trabalho Padronizado acaba por contribuir em larga escala para aquilo que é a melhoria contínua das organizações (pensamento base da filosofia *Kaizen*), uma vez que se trata de uma metodologia sem fim, cujo objetivo último passa pela criação de padrões, redução de variabilidade e otimização de processos. Isto que, consequentemente, baixa os custos e melhora a qualidade dos produtos [4], [5]. Ora, uma vez que os processos em questão estão sujeitos a melhoria contínua, os padrões vão melhorar ao longo do tempo, sendo que os novos padrões irão ser a nova base para novas e futuras melhorias, e assim consecutivamente, permitindo atingir uma padronização de processos otimizada [1], [5].

Conclui-se assim, que a existência de padrões (ou *standards*), potencia a estabilidade, impulsionando a melhoria contínua, na medida em que servem de suporte ferramentas como o Ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*). Deste modo, aquilo que se consegue atingir em termos de melhorias e estabilidade do processo, está, no fundo, suportado por um sistema baseado no conhecimento e nas competências, que, no âmbito da padronização, garante que não existem retrocessos naquilo que é a melhoria contínua dos processos [5].

Numa perspetiva mais holística, é possível afirmar que a padronização de processos, no seu todo, acaba por funcionar como mecanismo central de coordenação numa ótica de estratégias de gestão e integração global das organizações. No âmbito de analisar mais detalhadamente esta relação, o estudo [29] procurou avaliar a compatibilidade entre a dita padronização de processos e as características estruturais de várias empresas, concluindo que a padronização de processos a nível global pode efetivamente contribuir para o atingir de uma

gestão e integração global dos processos envolventes das organizações, fator esse, que se revela bastante significativo para o aumento da competitividade das mesmas [1].

2.1.2 Estado da investigação e aplicação da metodologia

Numa perspetiva mais prática, a padronização consiste num conjunto de boas práticas que permite garantir a repetibilidade e a reprodutibilidade de uma determinada tarefa. Estes dois conceitos, quando aliados, permitem quase que garantir o fator de previsibilidade à dimensão de gestão das organizações. Na teoria, esta previsibilidade acaba por garantir estabilidade, permitindo que todos os níveis hierárquicos se foquem na atividade de que estão encarregues, maximizando, assim, a agregação de valor [5], [24].

Tendo isto em conta, e sendo que acaba por ser aplicável a múltiplas áreas, é possível verificar que se tem vindo a realizar vários desenvolvimentos que abordam e analisam a Padronização de Processos e os seus respetivos resultados.

2.1.2.1 Tecnologias de Informação

Sendo que na atualidade se vive a era da globalização, é possível afirmar que para a maioria das organizações a padronização de processos começa, ou devia começar, pelas Tecnologias de Informação. Com a constante evolução tecnológica que se presencia, é de facto muito importante que as organizações se consigam manter atualizadas, uma vez que a entrada de novas tecnologias no mercado, ao nível da inovação das Tecnologias de Informação significa muitas vezes a introdução de novos processos de negócio, que podem ter a capacidade de potenciar o sistema da organização. Deste modo, uma solução eficaz passa pelo estabelecimento de alianças estratégicas entre os criadores e os utilizadores da tecnologia, por forma a agilizar o processo de padronização da mesma e a forçar as empresas a acompanhar a inovação para se manterem competitivas [30].

Para além disto, é possível deixar a nota de que seria importante aprofundar conclusões relativas à eficácia e benefícios da padronização em alguns processos associados principalmente às tecnologias de informação, na medida em que muitas vezes não é claro se os efeitos se devem à tecnologia em si ou à padronização realizada, devendo também ser feito um estudo e análise crítica acerca da possibilidade de alguns destes processos poderem ser candidatos a ser incluídos em estratégias de subcontratação [24].

2.1.2.2 Processos de Gestão Empresarial

Muito interligados e dependentes das Tecnologias de Informação, os Processos de Gestão Empresariais beneficiam da padronização através a utilização de terminologia comum

e padrão, o que agiliza muito aquilo que é o controlo de resultados ao longo dos vários processos das empresas. Para além disso, em áreas mais específicas como o *e-commerce*, são atualmente utilizados métodos como processos padronizados para compras eletrónicas, catálogos online com formato padrão, e muitas outras práticas de negócio relativas tanto a compradores e vendedores, como a fornecedores de tecnologia e autoridades de pagamento [5], [30].

Em geral, quanto mais global for a empresa em questão, torna-se mais difícil, e ao mesmo tempo, mais proveitoso a aplicação da padronização, tendo sido já comprovado na literatura que a padronização de processos empresariais pode levar ao aumento do valor do negócio, tal como o estudo [31] demonstra, ao analisar e padronizar um processo de recrutamento de um departamento de recursos humanos. No referido estudo de caso, a empresa em questão foi capaz de reduzir significativamente tanto o número de dias médio para efeitos de contratação de um novo colaborador, como os custos associados ao mesmo processo. Foi ainda possível concluir que a qualidade da gestão de dados dos candidatos sofreu uma melhoria, e que existiria espaço para uma redução da despesa relativa às funções administrativas do departamento nos variados locais de operabilidade da organização.

2.1.2.3 Indústria (Produção Automóvel; Padronização de Componentes)

A consolidação e globalização das indústrias que se tem verificado são os dois principais fatores responsáveis pelo aumento da complexidade no que toca a padronização dos processos. Independentemente do número de localizações de negócios que uma organização tenha, deve ser tido sempre em conta a padronização generalizada entre todas elas. Desse modo, procurando ter processos consistentes, e usando toda a tecnologia existente, as organizações podem agora padronizar os seus processos a um ritmo mais rápido. Para além disso, sendo característica comum das indústrias a abundância e heterogeneidade de processos existentes, torna-se assim proveitoso realizar uma caracterização dos mesmos, com o objetivo último de padronizar prioritariamente os processos que representam uma agregação de valor mais significativa, permitindo assim às empresas concentrar esforços na inovação de processos que realmente acrescentam valor significativo àquilo que é o modelo de negócio da empresa [1], [2].

Dado tratar-se de uma área que está intimamente ligada e dependente da capacidade produtiva que consegue gerar, é assim imperativo que neste contexto industrial se trabalhe num racional que promova a eficiência não só das máquinas como também dos operadores. Nesta linha de pensamento, surge a padronização, onde se procura padronizar operações, aumentar a geração de valor e diminuir a quantidade de resíduos que possam ser gerados, evitando nestes procedimentos diminuir a capacidade associada à produção [2], [32].

Apesar destas vantagens, existem ainda inúmeras empresas que continuam a executar uma produção dita tradicional, onde o trabalho padronizado não surge como prioridade [4]. Tendo isto em conta, é possível verificar que existe um esforço da comunidade científica em comprovar a eficácia destas práticas. No estudo [2], realizado numa empresa do setor automóvel, direcionada para a produção de componentes, a aplicação de métodos de padronização das operações numa determinada linha de produção resultou em inúmeras vantagens: redução do número de trabalhadores; minimização da variabilidade associada aos tempos de produção entre diferentes turnos; redução das deslocações entre operações; aumento de 16% em média em toda a linha na Eficácia Global dos Equipamentos (OEE); e diminuição significativa da quantidade de resíduos produtivos existentes nas instalações. Este estudo de caso permitiu ainda realizar ajustes similares a outras linhas da fábrica, permitindo assim um claro aumento da eficiência e eficácia da produção.

No seguimento deste estudo e de outros similares, é possível concluir que a padronização tem sido um dos tópicos onde mais investigação tem sido feita no que diz respeito a vários setores industriais, entre eles, o setor da indústria automóvel, o que contribuiu em larga escala para o seu desenvolvimento [4].

Para além de ser uma das indústrias mais competitivas do mundo, o mundo automóvel passa cada vez mais por uma evolução tecnológica que impõe processos cada vez mais desafiantes, a nível do seu desenvolvimento, validação e padronização. Em paralelo a esta evolução, os requisitos de qualidade do mercado são definidos com um maior nível de exigência, o que torna a produção de componentes uma tarefa muito exigente, na medida em que, sejam simples ou dinâmicos, na maioria das vezes resultam da junção de vários tipos de materiais e da utilização de vários tipos de processos, condições que podem levar a que seja difícil otimizar tanto questões como a produtividade como questões relacionadas com excesso de resíduos e/ou sucata [4], [33].

No entanto, a cada vez mais abrangente aplicação da padronização permite agilizar muitas dessas dificuldades, como demonstra o estudo [33], onde se pretendia efetuar uma melhoria do sistema de gestão dos dados relativos à sucata de uma empresa pertencente à indústria automóvel. Nesta investigação, foi possível criar uma aplicação informática que integrasse todos os procedimentos já existentes relativos à gestão da sucata e padronizasse todos os procedimentos de comunicação e seguimento de dados. Deste modo, foi possível otimizar os processos de reporte e análise de dados, aumentando a fiabilidade destes procedimentos em 76%, enquanto que foi também reduzido cerca de 75% do tempo e dos custos associados a todo este processo de tratamento de dados de sucata.

Para além da padronização de processos e metodologias, surge regularmente nesta indústria automóvel o termo de padronização de componentes, que se refere a situações onde vários componentes podem ser substituídos por um único componente, que agrega todas as funcionalidades dos demais, seja este componente dentro do mesmo produto ou entre pro-

mentos diferentes [2], [34]. Este tipo de metodologias acaba por trazer bastantes vantagens, principalmente quando nos referimos a componentes que são desenhados para múltiplos produtos e conseqüentemente, múltiplas empresas e mercados, que beneficiam muito em ter características de interoperabilidade, na medida em que agiliza muitos processos e resolução de problemas. No entanto, antes de ser tomada uma decisão acerca destes métodos, deve ser feita uma consideração acerca do impacto que terá em todas as fases da vida do produto em questão, de modo a tornar possível uma melhor tomada decisão. Com o devido planeamento e execução realizado, é possível verificar que, na maioria dos casos, a padronização de componentes resulta numa redução dos custos que chega a ser transversal às diferentes fases do ciclo de vida dos produtos em questão [2], [30], [34].

2.1.3 Relação com Parametrização e Especificação de Processos

No âmbito de garantir um produto final com qualidade, que cumpra com todas as expectativas do cliente, muitas são as camadas de controlo que surgem para dar essa garantia. A criação de requisitos, nomeadamente especificações, representa aquilo que são objetivos a cumprir na produção de um produto, para que se possa designar como sendo produto conforme. No entanto, a tarefa mais exigente passa pela identificação dos parâmetros que efetivamente devem ser controlados para que se garanta um bom produto final. Deve-se, portanto, definir os parâmetros críticos e desenhar especificações para este tipo de produtos. Neste processo, deve ser tido em conta um desenho completo e bem delineado, na medida em que se deve assegurar que quem efetivamente executa o processo tem tudo o que precisa para atingir o objetivo [3], [6].

Nesta linha de pensamento, é importante realizar uma padronização, na ótica de elaboração de um documento normativo específico para o processo em questão, que permite aos técnicos e operadores perceber os procedimentos que devem realizar de modo a controlar e monitorizar os ditos parâmetros críticos, que efetivamente devem ser padronizados, potenciando assim a produção conforme [24], [35].

É assim possível analisar a relação existente entre a padronização, a parametrização e a especificação de processos, e concluir que muitas vezes se tornam áreas dependentes umas das outras. No âmbito de uma determinação de parâmetros associados a um dado processo, por exemplo, torna-se muito importante utilizar procedimentos que se encontrem padronizados, uma vez que a consistência das condições e práticas a que sujeitamos o processo deve ser a mais alta possível, numa perspetiva de maximizar a redução de variabilidade, de modo a tornar a determinação de parâmetros o mais eficaz possível [36].

Após a definição de parâmetros, é muitas vezes necessário realizar uma especificação de processos, onde se associa aos parâmetros, nomeadamente os críticos, uma determinada

especificação que resulta de uma prévia definição de requisitos. Tendo as especificações definidas, torna-se importante uma monitorização constante, onde através de procedimentos operacionais e de experimentação padronizados, por exemplo, de medida ou de cálculo, se controla se os parâmetros cumprem com o objetivo. Deste modo, usando a padronização, é possível obter uma caracterização mais rápida tanto da evolução dos valores dos parâmetros, como da relação existente entre os mesmos [3], [6].

2.1.4 Vantagens, Desvantagens e Barreiras

Apesar de se tratar de uma prática amplamente conhecida e aplicada em muitas áreas e contextos, a Padronização de Processos pode nem sempre se revelar a melhor opção para as organizações.

2.1.4.1 Vantagens

Sendo a Padronização de Processos uma prática polivalente, é possível ver a sua aplicação através de múltiplas indústrias, onde à partida surgem inúmeras oportunidades de redução de custos, associadas à otimização de processos e ao aumento da capacidade em criar valor, promovendo a redução de custos diretos (financeiros) e reduções de custos indiretos (diminuição de tempo gasto) [5], [24].

Outra valência importante advém diretamente do facto de a padronização tornar muito claro para todos os operadores ou técnicos aquilo que são os procedimentos de trabalho, o que contribui em larga escala para a prevenção de defeitos e erros que podem ter impacto na produção, e consequentemente, na produtividade da empresa [5], [24].

Além de reduzir os custos e os erros, a padronização permite às organizações ter um fluxo de trabalho mais produtivo, na medida em que as fontes de variabilidade são minimizadas, o treino de novos operadores é agilizado, a segurança é melhorada, os defeitos de produção são diminuídos, e o tempo de paragens de produção são diminuídos. Para além disto, a padronização revela-se ainda uma ferramenta bastante útil, ao facilitar outras atividades de uma organização: auditorias; resolução de problemas; desenvolvimento de *poka-yokes*¹.

¹ Ferramenta utilizada na prática Lean com o intuito de evitar falhas, tornando uma operação ou atividade à prova de erros.

Tudo isto, acaba por contribuir em larga escala para a implementação de uma cultura de trabalho que tem por base a disciplina, fator que é muitas vezes subestimado no que toca à eficiência de uma empresa [5].

Na generalidade, o maior benefício relaciona-se diretamente com a capacidade que a Padronização de Processos tem de transformar sistemas complexos em sistemas simplificados, ao otimizar ao máximo aquilo que são os recursos e valências de uma organização, permitindo ganhos muito significativos de produtividade e eficiência [30].

2.1.4.2 Desvantagens e Barreiras

Apesar das vantagens identificadas, a Padronização de Processos pode revelar-se bastante complexa, na medida em que existe a possibilidade de surgir certos efeitos negativos associados à sua utilização. Para uma organização que se pretenda iniciar naquilo que é a exploração das técnicas de padronização, torna-se bastante provável que surja uma longa fase de adaptação, dado que se trata de uma valência que deve levar o seu tempo a ser implementada. Deste modo, considerando esta difícil difusão da padronização numa organização, é possível prever que para muitas das mesmas seja difícil de suportar um investimento tão direcionado ao longo prazo como este [30].

Na base da padronização existe uma tentativa de simplificar tudo o máximo possível. No entanto, essa simplificação pode acarretar algumas desvantagens. A padronização de componentes tem como um dos objetivos incluir os mesmos componentes em múltiplos produtos, muitas vezes acabando por direcionar esses componentes para múltiplos mercados, dependendo da variedade dos produtos. Deste modo, pode acontecer que o componente padronizado acabe por ter um excesso de funcionalidade, uma vez que deve satisfazer os requisitos e especificação de parâmetros de toda a gama de produtos dos quais irá fazer parte. Neste caso, o componente em questão apresenta assim uma maior tendência a ser mais pesado, volumoso, e menos eficiente a nível de consumo de energia, condições essas que não só aumentam o custo do componente, como o custo operacional relativo à efetiva utilização do produto onde este estará inserido. Para além disso, pode nem sempre ser fácil satisfazer completamente as preferências de todos os mercados para onde o componente está a ser produzido, criando uma barreira entre aquilo que é a simplificação dos componentes e a possível insatisfação de alguns clientes [2], [34].

Para além disso, no âmbito das organizações multinacionais, devem ser ainda aprofundados estudos que analisem e avaliem as dificuldades da aplicação da padronização quando o foco destas empresas é a procura local, o que é variável consoante a cultura ou país de localização. Com isto, é possível atingir da melhor forma um balanço entre os grandes investimentos que estas abordagens acarretam e a importância de ter componentes e equipa-

mentos flexíveis e ajustáveis face à evolução rápida da tecnologia que se verifica transversalmente em todos os setores do mercado [2], [24].

2.1.5 Adoção e Benefícios Adjacentes

Este estudo procurou analisar e avaliar os benefícios da Padronização de Processos, nomeadamente na melhoria das organizações. Foi possível, portanto, evidenciar que se trata de uma abordagem bastante viável para empresas que pretendem ter uma gestão global de todos os seus processos envolventes, e que procuram soluções que lhes permitem aumentar a sua competitividade e, conseqüentemente, a satisfação dos seus clientes.

Verifica-se que a gestão de topo acaba por ter um papel importantíssimo na implementação desta metodologia, na medida em que devem ser feitos esforços para implementar uma mudança de paradigma que leve à instalação de uma cultura de disciplina baseada na padronização e melhoria contínua, que seja transversal a toda a organização, permitindo retirar o máximo partido de vantagens tangíveis como o aumento de produtividade, melhoria da qualidade e a redução de desperdícios, e de vantagens por vezes intangíveis, como a melhoria das condições de trabalho e a satisfação do consumidor.

É possível concluir que esta metodologia se encontra em clara expansão, começando a afetar muito positivamente variadíssimos setores, com destaque para a indústria automóvel que tem ganho cada vez mais proeminência no mercado, devido ao constante aumento da qualidade dos seus produtos, que acaba por ser um resultado dos esforços de padronização e de melhoria contínua que tem sido feitos na indústria ao longo dos anos, permitindo ainda desenvolvimentos importantes na temática de padronização de componentes, que revela ter grandes benefícios e potencialidades para esta indústria.

No entanto, a Padronização de Processos pode revelar-se bastante complexa, levando a que seja uma valência que pode levar muito tempo a ser implementada, representando por isso um investimento a longo prazo que nem todas as empresas suportam. Para além disto, na tomada de decisão, ao aplicar a Padronização de Processos, deve ser sempre considerado todos os custos aplicáveis ao longo de todo o ciclo de vida do produto em questão, de modo a garantir que é efetuada uma gestão ótima de processos que contribua positivamente para atingir todos os parâmetros de qualidade, de custo e de especificação que são exigidos pelos clientes, maximizando a sua satisfação [37].

2.2 Relés

2.2.1 Funcionamento

Apesar de existirem muitos tipos, o estudo foca-se na análise de relés eletromecânicos, um dos principais tipos de relés, com várias subcategorias. Estes, são interruptores eletromecânicos (interligando uma parte mecânica com uma elétrica) que abrem e fecham circuitos, tendencialmente de cargas elevadas (tensões e/ou correntes). São capazes de controlar um circuito elétrico (alteração de estado) abrindo e fechando contactos num outro circuito através da aplicação de corrente elétrica [15], [17], [38].

É possível dividir o princípio de funcionamento dos relés eletromecânicos em circuitos. Estes dispositivos convertem um sinal de entrada elétrica para um sinal físico intermédio através do circuito primário, sinal esse, que despoleta a reconversão para um sinal elétrico, na medida em que o sinal físico ativa o circuito secundário através de um elemento comutável. De notar que é este sinal físico, não elétrico, entre os circuitos primário e secundário que fornece a separação galvânica [39]. Este isolamento consiste numa das principais funcionalidades do produto, uma vez que permite através de atuadores de pequenas correntes e tensões (circuito primário), controlar circuitos externos de grandes correntes e tensões (circuito secundário). De notar que estes circuitos são concebidos normalmente para correntes contínuas e que estas comutações de estado ocorrem normalmente no intervalo de poucos milissegundos, dependendo do tipo de atuadores e tensões envolvidas. Este intervalo temporal, que existe devido a uma inércia magnética que é causada por forças coercitivas, o que se revela um parâmetro importante a garantir aquando da produção deste tipo de componentes. Na figura 2.1 é possível ver uma ilustração de um relé eletromecânico [15], [17].

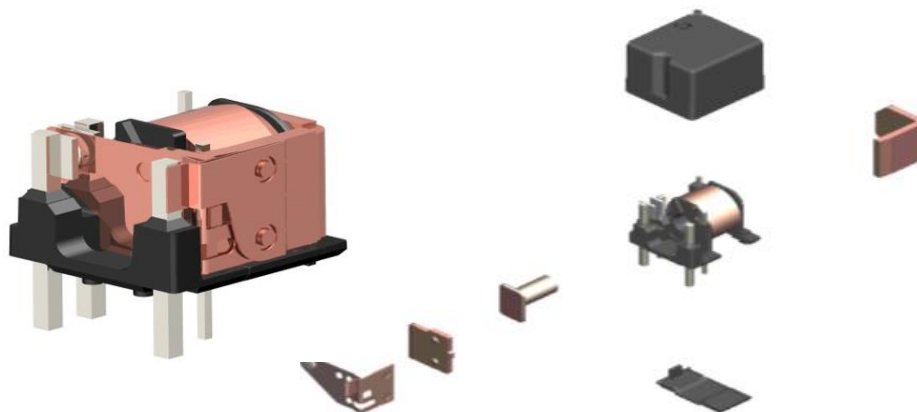


Figura 2.1 - Exemplo de um relé com os seus elementos integrantes

Os relés, têm sua história muito ligada aos desenvolvimentos do magnetismo e eletromagnetismo. A partir de literatura, como se relata em [15], [40], [41], é sabido que:

- Passagem de corrente elétrica num condutor gera campo magnético, sendo que se for num enrolamento, numa bobine, obtém-se um campo ainda mais intenso;
- A introdução de um núcleo ferromagnético no interior de um enrolamento intensifica magnitude da densidade do fluxo do campo magnético e a permeabilidade efetiva neste solenoide, transformando o núcleo num eletroímã;
- Um eletroímã tem a capacidade de atrair peças metálicas.

O funcionamento de um relé acaba por ser a aplicação de todos estes conceitos. Tem-se o circuito primário (ou de bobina), onde existe uma bobina de fio submetida a uma corrente de baixa intensidade através dos terminais próprios, que provoca um campo eletromagnético. Este campo que é impulsionado com a presença de uma peça de metal no interior da bobina, o núcleo ferromagnético (transformado num eletroímã), criando um solenoide, o que resulta na atração de uma outra peça metálica, de nome armadura, na direção do núcleo. No instante em que a força magnética gerada pelo solenoide se torna maior que a força da mola, esta última ajuda a armadura a movimentar-se, o que faz com que os contactos se movam, o que resulta na comutação de estado (fecha ou abre) do circuito secundário (ou de carga), que passa a conduzir ou deixa de conduzir energia elétrica, dependente do tipo de relé em questão. Esta comutação de estado tem como impedimento, em estado não energizado da bobina, o ar, que é um dielétrico, ou seja, um isolante elétrico. No entanto, tal como qualquer substância, sob a atuação de um campo elétrico exterior de intensidade acima do limite da sua rigidez dielétrica, permite o fluxo da corrente elétrica, tornando-se um condutor. Ao fecharem os contactos, tem-se elementos como a carcaça, e eventualmente outros elementos de ferro, que ajudam a concentrar e controlar o campo eletromagnético, tornando-o mais forte e estável. De notar que este circuito secundário tem geralmente muito mais potência do que o primário [15], [40], [41].

No sentido inverso de funcionamento, quando se cessa a corrente na bobina, o campo eletromagnético também cessa, fazendo com que a armadura e, conseqüentemente, os contactos, voltem para a posição inicial, por ação da mola. Pode-se concluir então que o bom funcionamento do relé, em todas as etapas de funcionamento, resulta em muito do equilíbrio que existe entre a força da mola e a força de atração magnética entre peças metálicas provocada pelo campo eletromagnético gerado [40]. De modo a ilustrar e resumir todo este modo de funcionamento pode-se observar na figura 2.2 uma ilustração deste processo. De notar que a situação 1 representa o relé no preciso momento em que a bobina começa a ser energizada e a 2 o momento depois da comutação de estado. De seguida, na figura 2.3, pode-se ver uma representação e identificação dos componentes mais comuns num relé eletromecânico [40]. Um relé eletromecânico é constituído por diferentes circuitos (representados na figura 2.2):

- Circuito de carga (ou de contacto, ou secundário): Componentes responsáveis pela comutação em si. Constituído pelos contactos e pelo sistema da mola. Mola sustenta aquilo que é o movimento dos contactos móveis, sendo suficientemente flexível para permitir o movimento dos mesmos, de modo a fechar ou abrir o relé [40].
- Circuito de bobina (ou de comando, ou primário): Constituído pela bobina, núcleo, carcaça e armadura. A bobina é responsável por gerar o campo magnético que, estabelecido com a ajuda do núcleo e da carcaça, cria a força necessária para movimentar a armadura, o que fecha o circuito magnético e movimenta o contacto móvel para o de fecho, fechando os contactos (no caso de um relé de fecho) [41].
- Circuito mecânico: Constituído pela capa e base que protegem o relé contra choques e influências externas. Pelos isolamentos, que separam o sistema primário do secundário. E eventualmente também podem existir pinos e/ou terminais, que efetuam a ligação do circuito de carga com o de contactos, e podem variar de tipo consoante a aplicação [40].

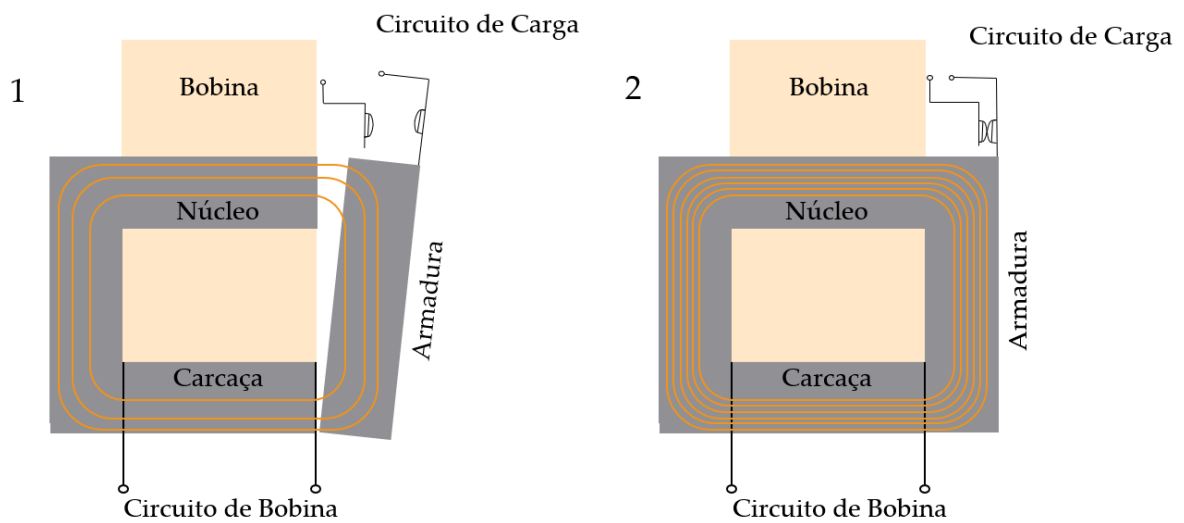


Figura 2.2 - Esquemática do funcionamento de um relé eletromecânico automóvel

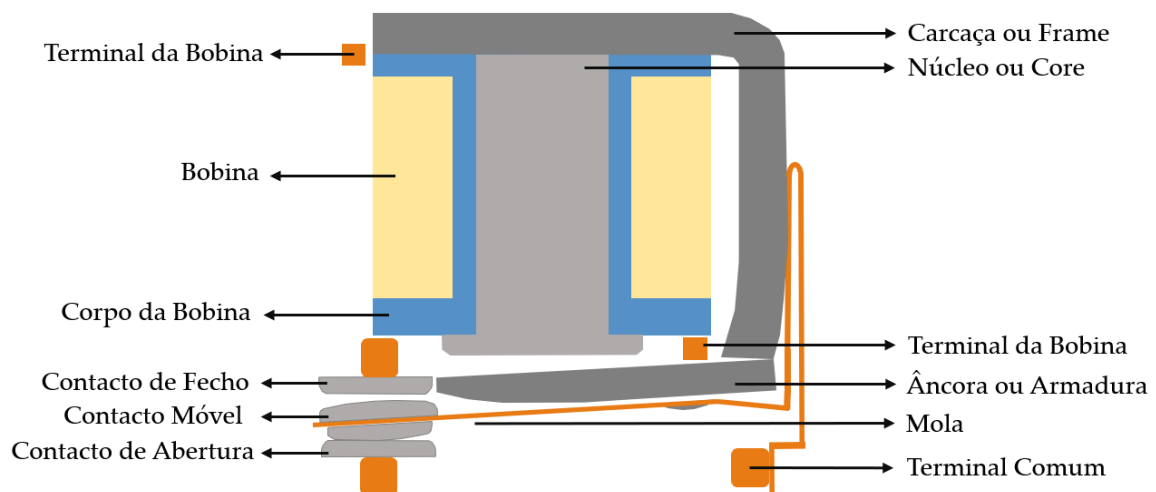


Figura 2.3 - Principais componentes de um relé eletromecânico

2.2.2 Tipos de Relés Automóveis

No mundo dos relés, e mesmo dentro dos relés eletromecânicos, existem inúmeros tipos e variantes, cada um com a sua função ou particularidade específica. No entanto, e focando na indústria automóvel, pode-se identificar os tipos de relés mais comuns como: Relés Plug-In, Relés de alta corrente (>75 A), Relés de alta tensão, Relés de PCB (circuitos impressos), Relés Personalizados, Relés para veículos elétricos e híbridos de alta tensão (contatores tendencialmente) [8], [15].

Uma variante que se encontra em fase de grande crescimento, dada a evolução da mobilidade elétrica no mundo, são os contatores. Sendo considerados como relés, os contatores são também dispositivos eletromecânicos de comutação, funcionando sobre o mesmo princípio físico dos relés, sendo que o termo relé é amplamente utilizado em várias indústrias para dispositivos de baixa e média potência, e o termo contator é mais comum na área de alta potência, como nos carros elétricos e híbridos. É possível então referir os mesmos como relés de alta potência ou contatores de alta potência [42].

Os relés classificam-se, como se analisa em [43], de acordo com:

- Relés normalmente abertos, sendo relés onde no estado de repouso se tem o circuito de potência aberto, estando os contactos abertos enquanto a bobina não está energizada, e fechados quando a bobina recebe corrente;
- Relés normalmente fechados, sendo relés onde no estado de repouso se tem o circuito de potência fechado, estando os contactos abertos quando a bobina recebe corrente, ao contrário dos NA;
- Relés de transferência: capazes de realizar ambas as situações anteriores, neste caso com um contacto central, sendo relés que permitem que se realize uma alternância de entrada do circuito de potência ao possuírem duas saídas distintas. No estado de repouso, este tipo de relé pode ter a entrada ligada ao circuito de potência X. O relé, ao ser atuado eletricamente consegue alterar a entrada do circuito de potência X para o circuito de potência Y;
- Relés biestáveis: relés que após a resposta a uma estimulação na entrada, mantêm o estado fixo mesmo após o extinguir da estimulação referida. Trata-se de um tipo de relé que é capaz de manter o seu estado (aberto ou fechado) sem a necessidade de ter uma atuação elétrica, contínua, que o suporte.

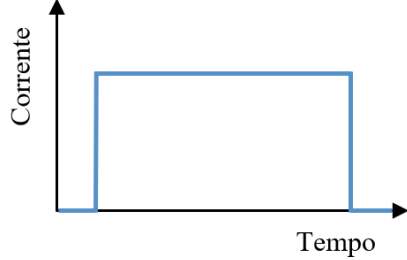
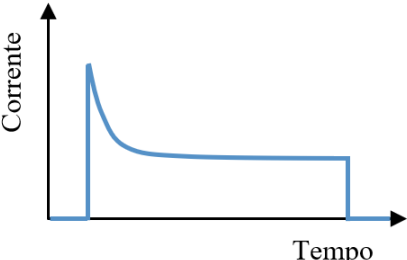
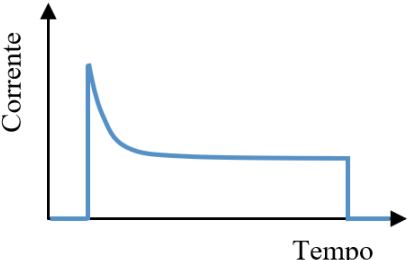
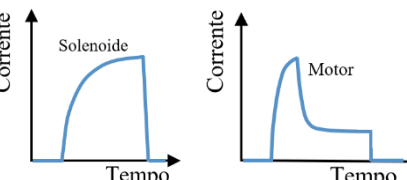
Outra categorização que é importante realçar é relativa aos tipos de circuitos elétricos, que influenciam diretamente o funcionamento do relé que é necessário. Os circuitos elétricos existentes nos veículos motorizados são de corrente contínua (CC). Deste modo, é possível dividir os tipos de circuitos elétricos num automóvel em três tipos simples: Circuitos Resistivos, Indutivos e Capacitivos. Esta divisão acaba por ser também refletida no que toca à aplicação de relés para automóveis, com a ressalva que estes tipos de circuitos podem ser muitas vezes mais complexos [15].

Como se pode analisar na tabela 2.1, a curva de corrente das cargas resistivas é apenas especificada pela tensão de carga e pela resistência de carga, atingindo de imediato o valor nominal e passando imediatamente a zero quando o circuito comutado é desativado. No caso concreto das lâmpadas, no início do processo o filamento está frio (com resistência mais baixa), e progressivamente aquece, aumentando a resistência. Neste tipo de circuitos capacitivos, como seria de esperar, uma vez carregados, ficam abertos. Trata-se assim de dois tipos

de circuitos mais simples, uma vez que o seu desenho e desenvolvimento passa muito por um simples ligar e desligar [43].

Para outro tipo de aplicações tem-se ainda as cargas indutivas, caracterizadas por um aumento inicial exponencial da corrente (semi-parábola invertida), mas mais lento relativamente ao fluxo de corrente inicial do caso anterior. De seguida, tal como em todos os casos, existe uma zona de estabilização. É possível notar que, principalmente no caso de aplicação a um motor, este comportamento descrito tem ainda um ênfase maior no pico de corrente que ocorre no início, podendo criar uma corrente inicial de dezenas (ou mesmo centenas) de vezes superior à corrente de funcionamento, com o propósito de suportar no acionamento de motores elétricos, como acontece em boa parte das aplicações destes tipos de circuitos em automóveis [43].

Tabela 2.1 - Aplicações de relés para automóveis por tipo de circuito elétrico

Tipo de Carga	Exemplos de Aplicação	Curva de Corrente Típica
Carga Resistiva Convencional	Mecanismos de Aquecimento (janelas, bancos, água, ar)	
Carga Resistiva do tipo lâmpada	Lâmpadas (visibilidade, nevoeiro, piscas)	
Carga Capacitiva	Condensadores de filtragem em módulos eletrônicos (módulo de gestão do motor, sistema ABS)	
Carga Indutiva	Solenoides (válvulas, embraiagens, bobinas, buzinas) Motores e Bombas (fecho central, ventilador, fecho janelas)	

2.2.3 Influência e Tendências do Mercado Automóvel

De uma forma geral, é possível afirmar que existem dois fatores muito relevantes responsáveis pelo crescimento atual do mercado dos relés para automóveis.

Primeiramente, tem-se a crescente tendência do mercado automóvel em direção aos veículos elétricos e híbridos, o que impulsiona esta indústria para um novo patamar, na medida em que estes veículos exigem dispositivos capazes de controlar e gerir as altas cargas que neles circulam, pelo que a necessidade de relés apropriados a estas funções sobe. De

modo a quantificar esta procura, é possível prever que até 2030, um em cada quatro carros novos vendidos será alimentado por baterias, sendo que se espera que esta relação aumente para mais de oitenta por cento até 2050. É por isso imperativo que estas indústrias invistam no sentido de aumentar e melhorar o seu portfólio de sistemas de conexão para cargas elétricas com elevada potência [14], [17], [41], [42], [44].

Em segundo lugar, outra tendência que o mercado automóvel verifica é relacionada com a crescente modernização dos veículos, com a procura por luxo, segurança, e conforto a impulsionar o mercado dos relés destinados a aplicações de potência em automóveis. Com a procura cada vez mais direcionada a veículos com melhor desempenho e melhor experiência de condução, os fabricantes de automóveis têm vindo a implementar inúmeras funções eletrônicas que procuram responder a estes requisitos. Para concretizar este passo, surgem os relés do ramo automóvel, contribuindo assim para uma previsão de crescimento deste mercado de 14,2 para 21,8 mil milhões de dólares americanos, no período compreendido entre 2019 e 2027 [16], [17], [42].

2.2.4 Aplicações

Os relés são um produto que pode servir a vários segmentos, como as telecomunicações (eletrónica geral e sistemas de comunicação), o segmento industrial (áreas como a aviação, marinha, militar, medicina, energia) e o segmento de transporte (aplicações automóveis, entre outras) [17], [45].

As aplicações podem-se dividir em três grandes grupos, nos quais se destacam vários exemplos práticos [14], [16], [17], [46].

- Sistemas gerais elétricos num veículo: Limpa para-brisas, motores diversos no carro, luzes de sinalização, controlo da bomba de gasolina, sistema alarme, controlo de faróis, desembaciador, antenas, sistema *start/stop*, motor de arranque, ventilador do radiador, suspensão.
- Sistemas de segurança automóvel: Sistema integrado ABS (*Anti-lock Bracking System*), sistema de suspensão, corte de corrente, desconexão da bateria, airbags, controlo colisão, sistema fecho central, sistema de assistência à condução.
- Funções conveniência e conforto: GPS, sistemas áudio, sistema de ar condicionado, ventilação, vidros e espelhos elétricos, ajuste elétrico dos bancos, aquecimento de vidros e bancos.

De notar que cada uma destas funções chega a ter ao serviço múltiplos relés, pelo que no cômputo geral um automóvel possui várias dezenas de relés. Um outro exercício que se pode fazer é relativo aos contadores de elevada tensão. Sendo muito direcionados para os

veículos elétricos e híbridos, acabam por ter aplicações e funcionalidades mais distintas que os relés para automóveis convencionais [14], [16], [17], [47].

Estes contatores de elevada tensão são muitas vezes integrados em plataformas elétricas complexas. Têm funções como o fornecimento (conexão) ou corte (desconexão segura) de energia ao motor elétrico a partir das baterias de tração durante o ciclo de condução. Como o fornecimento de energia às baterias durante o ciclo de carregamento e fornecimento de corrente para o funcionamento de sistemas auxiliares também de elevada tensão como os aquecedores e os compressores climáticos [42].

Nestas aplicações os contatores são aplicados geralmente em série com as baterias, para que a bateria só funciona se o relé assim o permitir. Veículos elétricos e híbridos chegam a levar até (e, em alguns casos, mais de) uma dezena de contatores, divididos por todas estas funções enunciadas [41].

2.2.5 Desafios Existentes

Como é possível concluir, os relés providenciam funções de comutação críticas em múltiplas aplicações, nomeadamente em segurança automóvel. Deste modo, é necessário que estes dispositivos sejam resistentes a elevadas tensões, correntes elevadas, choques, arcos elétricos, e eventuais impactos mecânicos, de modo a limitar o impacto do fator de desgaste. De um modo geral, pode-se dizer que é crítico que os relés tenham uma boa fiabilidade [39], [45].

E é neste sentido que se tem vindo a trabalhar, com os relés a responder às solicitações do mercado, evoluindo para uma maior fiabilidade, segurança e qualidade. No entanto, para além disto exige-se que existam evoluções a nível de peso, de dimensões, e de gastos energéticos, na medida em que se pretende cada vez mais otimizar o espaço ocupado e a eficiência associada ao consumo de energia por este tipo de aparelhos nos sistemas [14], [16], [46], [47]. Deste modo, torna-se crucial a capacidade de balancear um conjunto de objetivos de naturezas bastante conflituosas, que dificultam aquilo que é a industrialização de um produto bastante complexo e dinâmico, com montagens que podem englobar dezenas de peças, submetidas a diferentes processos como enrolamento, soldadura, inserção, *press-fit*, cunhagem, estampagem, entre outros. Para além disso, estes processos incluem diferentes materiais como metais (prata, cobre, aço, prata, entre outros) e polímeros, o que aumenta a complexidade envolvida [40].

Analisando em particular o subsetor dos contatores, estas exigências tornam-se ainda mais intensas, uma vez que se trata de um tipo de produto que se encontra ainda em constante alteração dos seus processos de engenharia, muito devido às rápidas mudanças e evoluções associadas tanto ao mercado (de veículos elétricos e híbridos) como à sua regulamen-

tação associada [42]. Neste mercado, procura-se cada vez mais contadores com uma maior capacidade de comutação, uma vez que este tipo de veículos comporta baterias com uma tendência crescente no que toca à capacidade energética [47]. Para um controlo seguro e fiável destas cargas, são necessários mais que os convencionais 12 Volts existentes nos sistemas dos veículos comuns, podendo chegar a ser requisitado a estes dispositivos o controlo de várias centenas de Volts [40]. Assim, e sempre na ótica da promoção da segurança do utilizador final, é necessário continuar a fazer esforços no sentido de aprimorar estas tecnologias [39], [42], [45], [48].

2.3 Processos de fabrico nos Relés

Os relés são produtos cuja industrialização se pode tornar bastante complexa. Para além da diversidade de processos e de materiais que podem estar associados a este tipo de fabrico, a evolução e mudanças que se verificam neste mercado, muito ao sabor daquilo que é a transformação em direção a uma mobilidade elétrica, tornam estes produtos num verdadeiro desafio para as empresas [40].

Um fator bastante relevante no fabrico deste tipo de produtos, é o facto de existirem muitos processos que requerem um nível muito elevado de precisão geométrica, dentro da gama dos micrómetros, de modo que atingir um controlo de qualidade a este nível se torna bastante desafiante de integrar nas linhas de produção, sejam elas automáticas ou manuais [49], [50]. A somar a isto, muitas vezes estes processos caracterizam-se por ter interações de variáveis bastante complexas, tornando difícil interpretar as influências entre fatores controláveis e fatores não controláveis, ou ruído [51].

No entanto, apesar das dificuldades, o objetivo global passa sempre por uma melhoria contínua dos processos, mantendo com isso uma produção fluída que permita às organizações atingir as suas metas. Para isso, é necessária uma grande agregação de conhecimento acerca dos processos, que permita dominar o impacto que as variáveis destes têm no produto final e respetivo tempo de vida do mesmo, de modo a retirar conclusões mais acertadas sobre aquilo que são melhorias de *design* e outras envolventes do processo [40], [51], [52].

2.3.1 *Press-fit*

Um dos processos mais comuns na produção de um relé consiste na montagem mecânica com interferência, sendo que muitas delas constituem aquilo que se pode chamar de um processo de *press-fit*. Este tipo de processo, que também é conhecido por *friction fit* ou *interference fit* é muito comum na produção industrial, e tem causado bastante interesse no

seio da comunidade científica, sendo particularmente relevante na indústria automóvel. Para além disso, tem sido também utilizado em áreas como a aeroespacial, agricultura, energia, transportes e medicina, com adaptações para cada tipo de aplicação [50], [53]–[55].

Este processo consiste numa fixação entre duas partes que é conseguida pela fricção que ocorre quando estas são empurradas uma contra a outra, sendo que geralmente se trata de uma peça cilíndrica que é forçada a entrar num furo, estando a mesma sobredimensionada em relação ao tamanho do furo, de modo a criar interferência. Apesar de esta junção ser possível tanto com força como com ajustes de temperatura, o foco vai ser feito no *press-fit* convencional, a montagem com força. Como é expectável, de modo a realizar o *press-fit* é necessário que exista uma força sobre a peça de inserção que a faça introduzir no furo, para o qual é preciso uma prensa, que pode ser hidráulica, pneumática ou eletromecânica [50], [53], [56], [57].

A forma mais usada para extrair informação e controlar este tipo de processo é com a ajuda de curvas de força-deslocamento captadas pelas prensas, de onde é possível retirar várias conclusões importantes acerca do que está a acontecer durante o *press-fit*. Nessa interface, é possível monitorizar, testar, e concluir acerca de vários parâmetros importantes como a força, o deslocamento e a velocidade, para além da possibilidade de controlo em tempo real de conformidade das curvas para com os limites impostos pelos requisitos do produto. Em segundo plano, tem-se também testes visuais, controlo de dimensões ou mesmo testes destrutivos, onde se analisa e avalia, nos pós processo, se as peças estão dentro dos requisitos e conformidades exigidas nas especificações de produto [50], [53], [54].

Para além de outras dimensões geométricas e características das peças em questão, o nível de interferência entre as superfícies de contacto das partes, a área de contacto em si e o deslocamento realizado pela prensa são dos fatores mais determinantes para a quantidade de força que é necessário fazer. No entanto, esta estimativa nem sempre é assim tão linear. Dependendo dos materiais em questão, a deformação elástica que se verifica tanto nas peças como na estrutura pode ter uma grande influência na medida em que existe uma recuperação do material (dependente das propriedades do mesmo e dos parâmetros do processo) que deve ser considerada, ressaltando ainda possíveis deformações plásticas que se procura evitar ao máximo para preservar o estado do material. Este fenómeno é caracterizado pela presença de uma fricção deslizante entre 2 corpos com características elásticas, sendo que a inserção tem geralmente uma fase estática, onde o sistema realiza uma acumulação de energia potencial elástica, seguida de uma fase chamada dinâmica, onde esta energia é convertida em movimentação relativa. Deste modo, para evitar ter uma grande incerteza em relação à posição final das peças, dada a referida recuperação elástica após a retirada da carga, são necessários sistemas onde os dados do processo sejam tratados por forma a distinguir claramente o início do movimento relativo irreversível das peças, ou seja, sistemas que consigam realizar uma compensação inteligente que absorva tanto alguma variabilidade das pe-

ças, como as elasticidades envolventes [50], [53], [58]. Uma representação esquemática de um exemplo de como pode ser um processo de *press-fit* pode ser vista na figura 2.4, onde se tem uma vista de corte de uma peça cilíndrica a inserir numa peça com um furo.

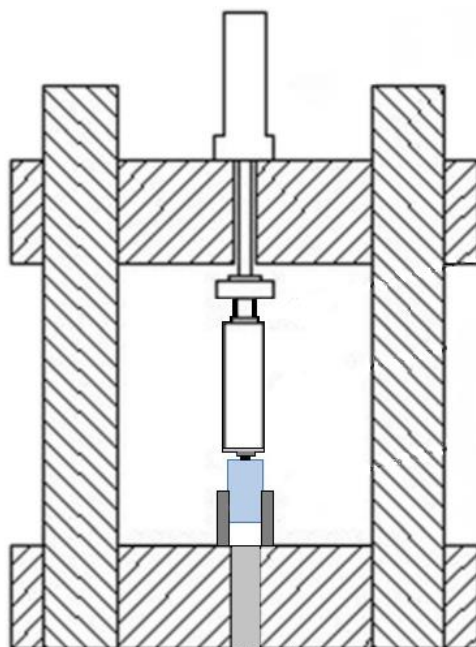


Figura 2.4 - Ilustração de uma estação de *press-fit* (adaptado de [53])

Para além da incerteza associada à posição das peças, é preciso ter em atenção que esta recuperação elástica faz com que nas superfícies de contacto e, principalmente nas zonas à volta do furo, existam tensões tangenciais a ser exercidas, o que em algumas aplicações deste tipo de processos pode levar a efeitos negativos a nível de fadiga, com a fricção excessiva a causar o desgaste dos componentes, podendo em casos extremos (sistemas com bastante vibração ou movimento) levar ao aparecimento e propagação de ranhuras, que podem comprometer todo o produto final em si [55], [57]–[60].

2.3.2 Estudo do Processo

Garantir a qualidade dos processos de *press-fit* é crucial dados os elevados requisitos das indústrias onde estes tipos de processos são comuns. Deste modo, vários estudos têm sido feitos no sentido de aprofundar o conhecimento sobre esta temática, explorando o processo em vários tipos de materiais, por forma a atingir *designs* de produto e configurações de processo que sejam capazes de garantir os requisitos de qualidade impostos [56], [60]–[62].

Quanto às tendências da comunidade científica, os tipos de estudo realizados têm utilizado ferramentas como *software* de métodos de elementos finitos e modelos 3D, no sentido de simular e perceber as potenciais influências que fatores como a morfologia da superfície, o grau de interferência, as propriedades dos materiais, as dimensões físicas e as variações de geometria possuem nas forças de montagem e nas tensões criadas principalmente à volta do furo e, conseqüentemente, na integridade das peças [50], [54], [55], [63].

No entanto, apesar de todos os esforços, ainda são precisos alguns desenvolvimentos. A presença de fatores como as forças de resistência à inserção, ou seja, as forças de fricção, que provocam condições não lineares e são difíceis de quantificar, fazem com se torne muito complicado retirar informação do processo de *press-fit*. As complexidades destes problemas tornam difícil a elaboração de modelos matemáticos capazes de prever estas relações, uma vez que estes necessitam de uma grande quantidade de dados que caracterize a relação existente entre os fatores como a geometrias dos materiais e as forças e tensões resultantes no processo. A somar a isso, tem-se a já referida recuperação elástica do material, que insere alguma incerteza no processo a nível de posição final e torna extremamente desafiante a obtenção de repetibilidade de processo e de previsões micrométricas acerca daquilo que é o produto final do processo [50], [54], [62].

Esta falta de previsibilidade leva a que, a longo prazo, se aumente a taxa de defeitos e os correspondentes custos de produção, pelo que se torna uma mais valia criar modelos experimentais que tenham em conta as variações características dos componentes associados aos processos de fabrico. Estes avanços devem aproveitar em paralelo os avanços a nível de capacidade de computação que se vão verificando, uma vez que estes revelam um grande impacto naquilo que é a modelação de processos (com recurso a ferramentas como métodos de elementos finitos e outros tipos de modelos) [50], [60].

2.4 Modelação Preditiva

Na atualidade, são cada vez mais as organizações que trabalham no sentido de retirar o máximo partido da informação e dos dados disponíveis, num esforço de reduzir tempo, esforço e custos associados ao desenrolar das atividades. Ao detetar tendências e comportamentos com antecedência, com a utilização de técnicas preditivas, facilita-se em muito a possibilidade de planeamento e trabalho proativo por parte das empresas, tornando a tomada de decisão das mesmas muito mais assertiva, o que a longo prazo se torna fundamental para a competitividade destas organizações [64], [65].

Com a crescente perceção das empresas acerca do valor dos dados, cada vez mais são as que apostam neste tipo de abordagem. A aposta no estudo de modelos preditivos verifica-se em inúmeros setores, procurando resolver objetivos bastante heterogéneos como a

previsão da procura, o planeamento de recursos materiais e humanos, a previsão de vantagem competitiva, o planeamento de atividades de manutenção, planeamentos a nível financeiro, previsão de doenças na medicina, previsão de *outputs* de processo no fabrico, entre outros [64], [66]–[68].

A análise preditiva engloba não só a modelação preditiva como campos como o *Data Mining*¹ e o *Machine Learning*². De um modo geral, serve para obter informações acerca dos resultados previstos do evento em questão. Pode-se dizer que a análise preditiva engloba três tipos de modelos, os modelos preditivos, os modelos descritivos e os modelos de decisão [67]. Focando na primeira modalidade, a modelação preditiva pode ser descrita como o processo de descobrir um padrão significativo nos dados, de onde se extrai informação utilizando diversas tecnologias com o objetivo de, ao modelar os dados, revelar padrões e relações que permitam aferir e responder de uma melhor forma aos desafios associados. Desta forma, são criados modelos capazes de prever um resultado em algum estado ou tempo futuro, com base na forma como os parâmetros de entrada do modelo influenciam o resultado final [65], [67].

¹ Processo de encontrar anomalias, padrões e correlações dentro de grandes conjuntos de dados para prever resultados.

² Trata-se do estudo de algoritmos informáticos que possuem a capacidade de melhorar autonomamente através da experiência e da utilização de dados.

2.4.1 Dados

Pode-se resumir a modelação preditiva a uma técnica estatística que utiliza o conhecimento e a extração de dados para prever resultados futuros previsíveis, com a ajuda de dados históricos e/ou atuais. Sendo os dados a principal base desta metodologia, a sua utilização bem-sucedida depende em muito do acesso a volumes de dados suficientes, precisos e significativos [64], [69].

No entanto, de modo a obter modelos que consigam providenciar tomadas de decisão intuitivas e certas é necessário fazer uma escolha de dados cuidada, na medida em que nem todo o tipo de dados são úteis. Dados históricos de um determinado evento nem sempre conseguem prever com confiança situações futuras, pelo que é necessária uma análise cuidada na recolha dos dados, de modo a evitar usar dados desatualizados que não se enquadrem no estado atual do sistema. Assim, evita-se a introdução de ruído no modelo, limitando a ocorrência de correlações e previsões incorretas baseadas em dados errôneos [64], [70].

Outro aspeto importante a considerar prende-se com a relação entre valor e custo (onde se inclui também o tempo disponibilizado), sendo que se deve trabalhar no sentido de estabelecer um equilíbrio entre aquilo que é o valor acrescentado ao modelo e os custos que as organizações incorrem ao obter os dados [64], [71].

2.4.2 Abordagem

De um modo global qualquer uma das formas de análise preditiva, incluindo os modelos preditivos, é composta pelas seguintes etapas: recolha de dados, análise de dados e análise estatística, modelação preditiva, validação científica e finalmente, análise e discussão de resultados [67].

Tendo isso por base, a abordagem neste tipo de modelos deve ser baseada numa perspetiva sempre a longo prazo, focando na melhoria contínua, na medida em que um modelo preditivo não deve ser fixo, mas sim validado e revisto regularmente, incorporando sempre mais conhecimento e informação relevante que contribua para o aumento da sua robustez. Deve-se garantir que os dados que entram para a formulação do modelo são sempre obtidos em condições iguais ou equivalentes, evitando misturar dados obtidos em condições de sistema diferentes, pois têm um impacto no resultado final [70], [72].

2.4.3 Análise de Regressão

Quanto às possibilidades de análise preditiva, tem existido desenvolvimentos em várias metodologias. Desde métodos com base em árvores de decisão, com base em rede neural artificial, métodos de modelo linear generalizado, métodos com base em várias análises de regressão, entre outros, esta tem sido uma área que muito tem progredido dado aos avanços de matérias como o *Data Mining* e o *Machine Learning*, que estão associadas em paralelo a inúmeras metodologias [64], [67], [72], [73].

A nível de processo é possível verificar uma aposta em análises de regressão, utilizadas por vezes em paralelo com ferramentas como o DOE, tanto como métodos preditivos como métodos de otimização, como se pode verificar nos estudos [51], [74]–[76]. Nos estudos enunciados, é possível ver como esta metodologia permite realizar uma caracterização dos processos de modo a atingir e cumprir com os requisitos necessários, ao aumentar a qualidade e ao diminuir o desperdício. Nesta técnica, é investigada uma relação causa e efeito entre variáveis dependentes e variáveis independentes (preditores), o que permite calcular os valores previstos das variáveis dependentes. A modelação preditiva nestes casos, em si, é o fruto de um ajuste de uma curva (linha) aos pontos de dados, tentando minimizar as diferenças entre as distâncias dos pontos de dados à curva ou linha em questão [77].

2.4.4 Futuro da Modelação Preditiva

Em suma, a modelação preditiva acrescenta valor na medida em que permite reduzir tempo, esforço e custos associados. Ao modelar por completo o sistema que se tem em mãos, abre-se um leque de possibilidades de previsão que pode ser uma grande mais-valia para as organizações, uma vez que idealmente passa a ser possível modelar rapidamente múltiplos cenários que lidam com todas as condições e flutuações das variáveis do nosso sistema [64], [65].

Apesar de todas estas capacidades, a tecnologia em causa ainda se encontra numa fase bastante inicial do seu desenvolvimento e das suas capacidades. Com a melhoria das metodologias, das técnicas e das ferramentas tecnológicas em uso, também os benefícios para as organizações vão sofrer uma melhoria significativa [67], [68].

MÉTODOS

Neste capítulo é trabalhado o conceito de Qualidade e são exploradas algumas técnicas e ferramentas da temática, tais como a Análise de Variância e o Desenho de Experiências, que por certo trazem valor acrescentado ao desenvolvimento deste estudo.

3.1 A importância da Qualidade na Indústria Automóvel

Apesar de a qualidade ter sido sempre um conceito essencial ao homem, aplicado de diferentes formas em variadíssimas áreas, constituindo uma parte muito relevante de produtos e serviços, nas últimas décadas, com a massificação da produção industrial, tem imergido cada vez mais a implementação de ferramentas da qualidade naquilo que é a otimização e melhoria dos seus processos [78].

Atualmente, o nível de exigência dos consumidores é cada vez mais elevado, o que induz uma postura bastante competitiva entre empresas. De modo a suportar estes requisitos e cumprir com os padrões de qualidade impostos pelos clientes, é necessário trabalhar no sentido da obtenção de processos produtivos estáveis, que sejam capazes, centrados, e que tenham pouca variabilidade. Só desta forma as organizações dependentes de processos conseguem evoluir e implementar uma cultura de melhoria contínua que melhore a relação entre os custos e a proposta de valor a entregar a todos os *stakeholders* envolvidos [2], [4], [5].

Não fugindo à regra, a indústria automóvel revela uma grande dependência do fator qualidade, sendo completamente decisivo para o sucesso duma empresa neste setor. Trata-se de uma área que serve de referência e que tem a qualidade como o indicador que geralmente tem a maior ponderação a nível de relevância. A capacidade de uma organização conseguir fabricar automóveis com elevada qualidade, sem necessitar de aumentar progressivamente os custos da produção possui um grande impacto na margem competitiva que esta consegue alcançar [1], [7].

Antes de mais, importa definir o que é um processo. É possível definir um processo como um conjunto de atividades interrelacionadas e interactuantes que transformam entradas em saídas com valor acrescentado. No entanto, é possível aprofundar esta definição, tal como em [79], e entender que, no caso dos processos de fabrico o objetivo é medir, controlar, monitorizar e avaliar as saídas, pelo que se deve identificar quais os parâmetros ou características da qualidade que se justifica ter sob controlo. Estas características dependem da própria definição do processo produtivo na medida em que possuem causas de variabilidade associadas inerentes a esta definição, estando esta variabilidade associada às variáveis não controláveis, ou muito difíceis de controlar. Para além destas, tem-se ainda outras fontes de variabilidade, associadas às variáveis controláveis do processo, comumente chamadas de fatores nestas temáticas [78], [80]. Uma representação desta definição de processo de produção pode ser encontrada na figura 3.1.

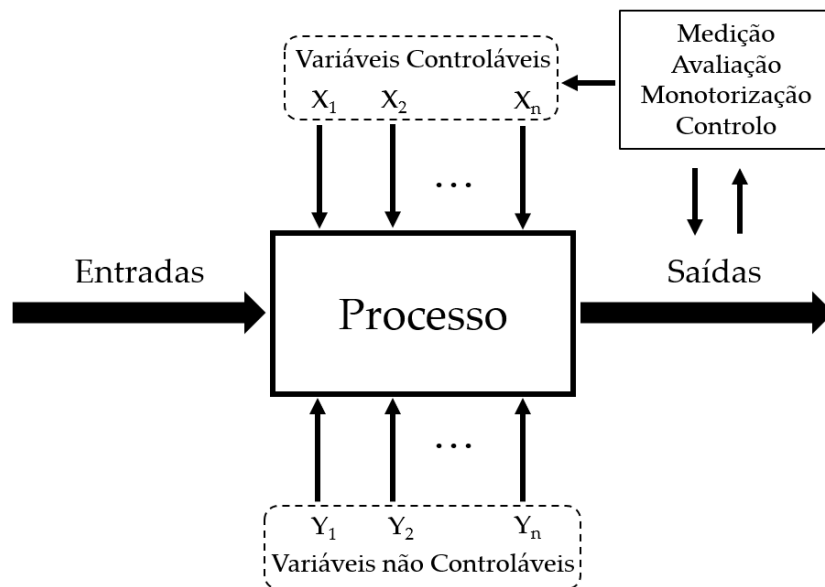


Figura 3.1 - Entradas e saídas de um processo de produção (adaptado de [81])

Para além da definição das características da qualidade a estudar, importa perceber toda a envolvente ao processo, pelo que se deve entender a origem da variabilidade que o caracteriza. Na fase de desenvolvimento do produto é delineado o processo produtivo, na medida em que são seleccionadas matérias-primas, equipamentos, especificações, entre muitas outras características, que acabam por ditar certa variabilidade de processo. Estas causas de variabilidade não controláveis, ou difíceis de controlar, podem ser provenientes de [79]:

- Mão-de-obra (estado físico e emocional, habilitações, formação).
- Métodos utilizados (métodos desajustados, não definição de operações, entre outros).
- Matéria-prima (qualidade e variabilidade da matéria-prima).

- Equipamento (desgaste, vibrações, entre outros).
- Metrologia (erros de medição, uso incorreto do equipamento, equipamento de medição desadequado).
- Meio ambiente (temperatura, humidade, poeiras, radiações, entre outros)

Por outro lado, as variáveis controláveis consistem em todas as variáveis de processo que é possível alterar facilmente, como por exemplo a temperatura, a pressão, o caudal, entre outros, dependendo do tipo de processo em questão [79].

Com esta caracterização do processo em mente, é importante recordar que o objetivo máximo da qualidade passa pela satisfação do cliente, pelo que se deve garantir que todas as características da qualidade do processo cumprem com os requisitos estipulados. Para isto, é necessário que os processos sejam capazes, estejam centrados de acordo com a especificação técnica, e tenham variabilidade mais baixa possível [81].

Ora, de modo a atingir tudo isto é necessário a aplicação de vários conceitos da qualidade. Para tornar um processo capaz, é preciso realizar uma recolha e estudo de dados por forma a obter um controlo estatístico do processo e uma análise da sua capacidade. Em paralelo a isto, se houver a necessidade de centrar o processo, deve-se agir em conformidade, aplicando ações corretivas. Já em relação às reduções da variabilidade relacionadas com as variáveis controláveis do processo, é necessário recorrer a ferramentas da qualidade como ferramentas básicas gráficas e de gestão, desenhos de experiências ou ainda especificamente os métodos de Taguchi [51].

3.1.1 Desenho de Experiências

O desenho de experiências consiste num conjunto de procedimentos através dos quais se efetuam intencionalmente alterações de certos parâmetros ou variáveis do processo (fatores), de modo a observar as mudanças que ocorrem nas saídas (variáveis de resposta), principalmente nas características da qualidade que se pretende ter sob controlo no sistema, sempre com o intuito de concluir acerca de causalidades, como analisado na figura 3.1. É assim estudado o comportamento de um dado processo, determinando quais os parâmetros que exercem maior influência no desempenho do mesmo. É possível identificar quais os fatores que influenciam as saídas e quantificar relações entre os próprios fatores e entre os fatores e as variáveis de resposta. Com base nisto, é possível concluir acerca dos melhores níveis, ou seja, valores que o fator assume, tanto de forma a otimizar o processo no que diz respeito às características da qualidade como a reduzir a variabilidade associada ao mesmo, aumentando a consistência do processo produtivo. Estes níveis são geralmente dois, representados por -1 e +1, ou seja, nível baixo e nível alto do fator, respetivamente [77], [79], [80], [82].

Trata-se de uma ferramenta que é considerada uma das mais relevantes a nível de engenharia relativamente à melhoria do desempenho de processos de fabrico. Para além disso, tem vindo a ser aplicada com sucesso às mais variadas atividades científicas e industriais, provando a sua capacidade de redução de variabilidade e consequente redução de custos e tempo para as organizações, melhorando assim os níveis de produtividade numa perspetiva contínua [77]–[79], [82], [83].

Muitas vezes aliado a ferramentas tais como a regressão é possível encontrar aplicações deste método em áreas como a eletrónica, contribuindo para o desenvolvimento da tecnologia, para a otimização dos *designs* de aparelhos eletrónicos, para a modelação de janelas de processos e para vários tipos de construção de aplicações industriais nesta área [76], [82], [84]–[86]. É de notar também uma forte presença a nível de aplicação de DOE naquilo que é a otimização e melhoria contínua de processos de fabrico, seja em áreas como a farmácia, como observado em [78], [87], ou mesmo em áreas como a cromatografia, como estudado em [75]. Reforçando a versatilidade desta ferramenta é ainda possível analisar aplicações de sucesso em áreas tão singulares como a previsão de eventos desportivos, como estudado em [80], ou como a otimização e *design* de sistemas aeroespaciais, como explorado em [88]. No entanto, apesar de este tipo de utilizações e objetivos de aplicação de DOE serem os mais comuns e aceites na comunidade científica, pretende-se nesta dissertação explorar a utilização do DOE também como metodologia para atingir a modelação preditiva. Pretende-se estudar esta aplicação inovadora do DOE e concluir acerca das possibilidades deste tipo de ferramenta nestas temáticas [89].

Para um melhor entendimento, torna-se importante definir algumas terminologias e princípios usados no DOE. Assim sendo [79]:

- Efeito – Alteração média provocada na resposta do sistema, provocada pela mudança de nível de um ou vários fatores.
- Resposta – Característica do processo ou sistema em estudo que se pretende avaliar. Depende da interação de todos os fatores e consiste num indicador de desempenho.
- Replicação – Consiste na repetição da mesma experiência sob condições iguais e espaçadas no tempo. Permite obter uma estimativa do erro da experiência e uma estimativa mais precisa do efeito dos fatores na resposta. A réplica é o valor da resposta em cada uma das replicações.
- Aleatoriedade – Trata-se de um princípio muito relevante a ter em conta no uso deste tipo de ferramentas estatísticas que incluem a experimentação. Permite estabelecer uma ordem (ordem padrão), ao acaso, pela qual devem ser realizadas as experiências, de modo a tornar os dados independentes entre si.

Para além disso, pode-se ainda utilizar a categorização dos dados por blocos, o que permite reduzir ou eliminar a variabilidade introduzida na experimentação por fatores que

podem influenciar o valor das respostas, mas que não são considerados relevantes para o estudo em questão.

Existem duas formas principais de aplicação desta ferramenta. Uma metodologia de aplicação consiste em recorrer ao denominado Desenho Fatorial Completo, ou seja, o estudo completo. Aqui, é incluído no planeamento a realização de todas as combinações possíveis entre todos os fatores escolhidos para controlar e respetivos níveis associados. No entanto, este tipo de estudo apresenta a desvantagem de, em casos onde o número de fatores é muito elevado, se tornar uma técnica muito morosa e impraticável a nível de custos, uma vez que ao adicionar variáveis controláveis selecionadas para controlo, incorre-se num aumento exponencial de experiências a realizar. Num estudo onde se tenha k fatores a n níveis, ter-se-á n^k experiências a realizar. Deste modo, facilmente se torna uma técnica muito dispendiosa, na medida em que existe muito tempo consumido, muita mão de obra necessária, e muito material ou produto que é desperdiçado, se se tiver em consideração que podem estar em causa experimentações destrutivas [78], [80].

Uma outra metodologia, denominada de Desenho Fatorial Fracionado, consiste num estudo parcial, onde são omitidas algumas combinações possíveis entre os fatores. Desta forma, reduz-se não só o número de experiências a realizar como também o número de resultados experimentais a obter. No entanto, esta redução possui algumas implicações, uma vez que se incorre no risco de perder dados e informação que poderia eventualmente representar alguma significância. Este tipo de Desenho de Experiências recorre à criação de geradores por forma a reduzir o número de experiências a realizar, tentando sempre minimizar a perda de informação neste processo. Estes geradores consistem em fatores cuja combinação de níveis estabelecida para a realização das experiências possa ser construída a partir de uma interação entre dois ou mais fatores principais (ou seja, não gerados). Nesta metodologia, para um desenho do tipo 2^k , cada gerador utilizado permite reduzir em metade o número de experiências a realizar, pelo que, por exemplo, o uso de 2 geradores permite reduzir para $\frac{1}{4}$ o número de experiências a realizar. Assim, comparando diretamente com o Desenho Fatorial Completo, o número de experiências a realizar nesta técnica, redefine-se para n^{k-p} , em que p representa o número de geradores utilizados [79].

A aplicação desta ferramenta deve ter por base uma sequência lógica que suporte todo o planeamento [77], [86]. O esquema da figura 3.2 pretende resumir de forma concisa as várias etapas.

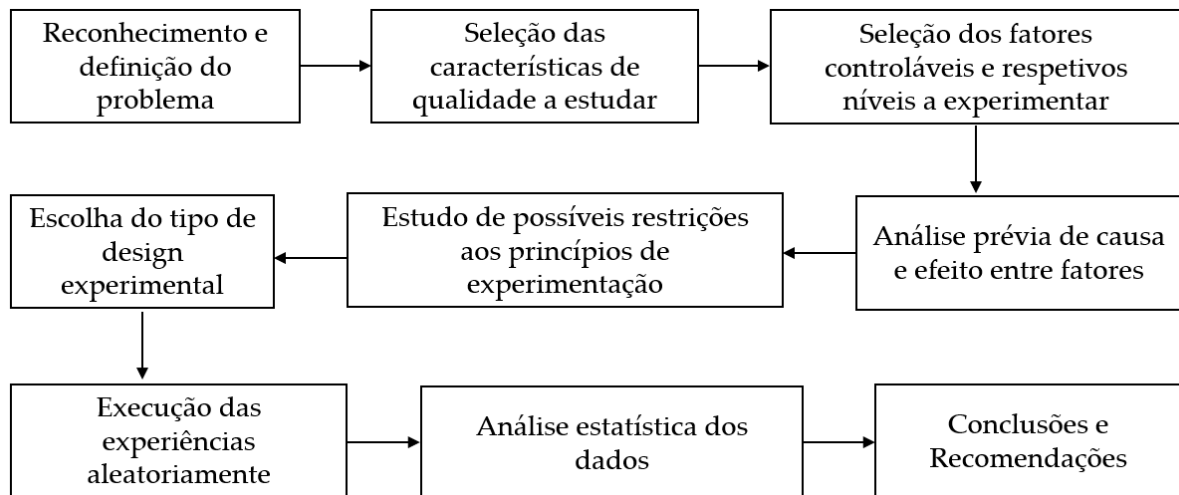


Figura 3.2 - Esquema de abordagem no planeamento de DOE (adaptado de [79])

3.1.2 Análise de Variância

Após a realização das experiências deve-se utilizar a análise de variância (ANOVA) para o tratamento estatístico dos resultados obtidos. Deste modo, torna-se possível identificar quais os fatores ou interações que afetam significativamente as respostas, bem como avaliar interações entre os próprios fatores. Com isto, tendo esses fatores identificados, sejam eles fatores isolados ou fatores em interação, é possível estabelecer a melhor combinação de fatores para a otimização das características de qualidade em estudo, bem como a melhor combinação para reduzir a variabilidade do sistema em causa [77], [79], [86].

Trata-se de uma metodologia com bastante relevo na comunidade científica, tendo vindo a ser aplicada com sucesso em áreas da ciência como as já enunciadas, uma vez que a utilização de DOE pressupõe sempre uma posterior análise estatística dos dados, geralmente realizada com recurso à análise de variância [77], [79].

A análise de variância consiste numa técnica estatística que permite comparar parâmetros de duas ou mais populações. Trata-se de uma ferramenta que verifica se as médias das populações em estudo apresentam diferenças ou não, com base no Teste de Hipóteses, sendo que a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1) são dadas normalmente por:

$$H_0: \text{não existem diferenças entre as médias das populações} \quad (3.1)$$

$$H_1: \text{existe pelo menos um par de médias das populações diferente}$$

Assim, é possível concluir se as diferenças existentes existem ou não, ou seja, concluir se se está perante populações com diferenças entre si, ou se as diferenças são provenientes apenas da variabilidade inerente ao processo em si. Através deste estudo, ao dividir a variabi-

lidade total associada aos dados experimentais pelos vários fatores selecionados, é possível determinar quais destes são estatisticamente significativos [79].

Tendo isto por base, consoante os dados que se tem em mãos, existem vários tipos de ANOVA que podem ser aplicados, sendo a seguinte caracterização fundamentada em detalhe em [79].

3.1.2.1 ANOVA - 1 Fator a vários níveis

Na tabela 3.1 encontra-se representado estudo do efeito de um fator, para o qual foram selecionados vários níveis, tendo sido replicada n vezes cada experiência.

Tabela 3.1 - Planeamento dos dados para ANOVA com um fator a vários níveis (adaptado de [79])

Nível $i = 1, 2, \dots, a$	Valor das réplicas $j = 1, 2, \dots, n$	Soma Y_i	Média \bar{Y}_i
1	$y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n}$	Y_1	\bar{Y}_1
2	$y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2n}$	Y_2	\bar{Y}_2
3	$y_{31}, y_{32}, \dots, y_{3n}$	Y_3	\bar{Y}_3
...
a	$y_{a1}, y_{a2}, \dots, y_{an}$	Y_a	\bar{Y}_a

Neste caso descrito tem-se então um fator A, para o qual se selecionam vários níveis a . O modelo em questão possui os níveis escolhidos pelo investigador, sendo definido por:

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (3.2)$$

onde,

Y_{ij} – Observações independentes e normalmente distribuídas com média $\mu_i = \mu + \tau_i$ e variância homogénea σ^2

μ – Média global, um parâmetro comum a todos os níveis

μ_i – Valor esperado do grupo de observações correspondentes ao nível i

τ_i – Parâmetro correspondente ao efeito do nível i

ε_{ij} – Variável aleatória normalmente distribuída com valor esperado nulo e variância constante σ^2

Y_i – Representa a soma dos valores observados no nível i

\bar{Y}_i – Representa o valor médio dos valores observados no nível i

Tendo isto por base, para se testar se existe diferenças significativas entre os diversos níveis o seguinte teste de hipótese é formulado:

$$\begin{aligned}
 H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a \\
 H_1: \mu_i \neq \mu_k \text{ para, pelo menos, um par } (i, k)
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Para aplicar este teste recorre-se à ferramenta da tabela ANOVA, como se pode ver na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Tabela ANOVA para um fator a vários níveis (adaptado de [79])

Fonte de Variação	SS (Soma de Quadrados)	g.l. (graus de liberdade)	MS (Quadrados Médios)	F_0
Entre Níveis	SS_B	$a - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{a - 1}$	$\frac{MS_B}{MS_W}$
Erro (interior)	SS_W	$N - a$	$MS_W = \frac{SS_W}{N - a}$	
Total	SS_T	$N - 1$		

Sendo que,

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{(Y_{..})^2}{N} = SS_B + SS_W
 \tag{3.4}$$

Com,

$$Y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}
 \tag{3.5}$$

e,

$$\frac{(Y_{..})^2}{N} = FC \text{ (Fator de Correção)} = \frac{(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij})^2}{N}
 \tag{3.6}$$

$$N = n_1 + n_2 + \dots + n_a = a * n
 \tag{3.7}$$

$$SS_B \text{ (Variação entre os níveis com } (a - 1) \text{ g.l.)} = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i.}^2}{n} - \frac{Y_{..}^2}{N}
 \tag{3.8}$$

$$SS_W \text{ (Variação Residual ou Erro)} = SS_{\text{Erro}} = SS_T - SS_B \quad (3.9)$$

A estatística para testar a hipótese nula é a seguinte:

$$F_0 = \frac{MS_B}{MS_W} \quad (3.10)$$

Com base em todas estas equações é possível construir a tabela ANOVA, o que permite comparar a estatística de teste (F_0) com o valor crítico ($F_{\text{crítico}} = F_{\alpha;(a-1);(N-a)g.l.}$), obtido com ajuda das tabelas da distribuição de Fisher. Caso $F_0 > F_{\alpha;(a-1);(N-a)g.l.}$ rejeita-se a hipótese nula e conclui-se que há diferenças entre os níveis do fator, tendo MS_B maior que MS_W . Quando não existe diferenças entre os níveis, MS_B e MS_W são muito semelhantes.

3.1.2.2 ANOVA - Vários fatores a vários níveis

Por outro lado, quando se pretende estudar o efeito de vários fatores ao mesmo tempo numa resposta, a ANOVA a utilizar apresenta umas ligeiras alterações face à anterior. A grande vantagem deste método é a possibilidade de detetar interações entre os diversos fatores, ou seja, explorar situações onde o efeito de um fator na resposta depende do nível de um outro fator. Assim, é possível estudar tanto os efeitos principais, de fatores isolados, como os efeitos da interação entre vários fatores. Como exemplo, baseado no explorado em [79], explorar-se-á um exemplo onde se tem 2 fatores, A e B, para os quais são selecionados, respetivamente, a e b níveis. As réplicas existentes permitem realizar uma estimativa do erro da experiência, e prever de uma melhor forma tanto a interação entre os fatores como o efeito dos fatores na resposta.

O modelo em questão possui os níveis escolhidos pelo investigador, sendo definido por:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (3.11)$$

onde,

y_{ijk} – Observação k independente e normalmente distribuída para combinação do nível i do fator A com o nível j do fator B (com $i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, n$)

μ – Média global, um parâmetro comum a todas as observações

τ_i – Efeito do nível i do fator A

β_j – Efeito do nível j do fator B

γ_{ij} – Efeito da interação entre o fator A e o fator B

ε_{ijk} – Variável aleatória normal e independentemente distribuída com valor esperado nulo e variância constante σ^2

Tendo isto por base, para se testar se existe diferenças significativas entre os diversos níveis o seguinte teste de hipótese é formulado:

Representação para o efeito i do fator A

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \text{Pelo menos um } \tau_i \neq 0 \quad (3.12)$$

Representação para o efeito j do fator B

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_a = 0$$

$$H_1: \text{Pelo menos um } \beta_j \neq 0 \quad (3.13)$$

Representação para o efeito da interação entre o fator A e o fator B

$$H_0: \gamma_{ij} = 0 \text{ para qualquer par } (i, j)$$

$$H_1: \text{Pelo menos um } \gamma_{ij} \neq 0 \quad (3.14)$$

Na tabela 3.3 é possível observar o planejamento dos dados para ANOVA com vários fatores a vários níveis. Para aplicar este teste recorre-se à ferramenta da tabela ANOVA, como se pode ver na tabela 3.4, onde é apresentado o caso em que se possui 2 fatores.

Tabela 3.3 - Planejamento dos dados para ANOVA com dois fatores a vários níveis (adaptado de [79])

Fator A	Fator B				$Y_{i..} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}$
	1	2	...	b	
1	y_{111} y_{112} ...	y_{121} y_{122} ...	...	y_{1b1} y_{1b2} ...	$Y_{1..}$
2	y_{211} y_{212} ...	y_{221} y_{222} ...	...	y_{2b1} y_{2b2} ...	$Y_{2..}$
...
a	y_{a11} y_{a12} ...	y_{a21} y_{a22} ...	...	y_{ab1} y_{ab2} ...	$Y_{a..}$
$Y_{.j.} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk}$	$Y_{.1.}$	$Y_{.2.}$	...	$Y_{.b.}$	$Y_{...} = \sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk}$

Tabela 3.4 - Tabela ANOVA para dois fatores a vários níveis (adaptado de [79])

Fonte de Variação	SS (Soma de Quadrados)	g.l. (graus de liberdade)	MS (Quadrados Médios)	F_0
A	SS_A	$a - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a - 1}$	$\frac{MS_A}{MS_{AB}}$
B	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$\frac{MS_B}{MS_{AB}}$
AB	SS_{AB}	$N - a$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{N - a}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_{Erro}}$
Erro	SS_{Erro}	$(ab)(n - a)$	$MS_{Erro} = \frac{SS_{Erro}}{(ab)(n - a)}$	
Total	SS_T	$N - 1$		

Sendo que,

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{(Y_{...})^2}{abn} = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_{Erro} \quad (3.15)$$

Com,

$$N \text{ (Nº de Observações)} = a * b * n , \text{ com } n \text{ a ser o nº de replicações} \quad (3.16)$$

e,

$$\frac{(Y_{...})^2}{N} = FC \text{ (Fator de Correção)} \quad (3.17)$$

$$SS_A \text{ (Variação entre os níveis do fator A)} = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{bn} - \frac{(Y_{...})^2}{N} \quad (3.18)$$

$$SS_B \text{ (Variação entre os níveis do fator B)} = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{an} - \frac{(Y_{...})^2}{N} \quad (3.19)$$

$$SS_{AB} \text{ (Variação associada à interação AB)} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{n} - \frac{(Y_{...})^2}{N} - SS_A - SS_B \quad (3.20)$$

$$SS_{Erro} \text{ (Variação Residual ou Erro)} = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (3.21)$$

Com base em todas estas formulações é possível construir a tabela ANOVA e retirar conclusões, sendo que a estatística para testar a hipótese nula e concluir acerca dos fatores ou interações de fatores que se revelam significativos segue os mesmos contornos do procedimento na ANOVA com um fator a vários níveis.

3.1.2.3 Análise de Resíduos

Estes métodos utilizados para a Análise de Variância pressupõem certas hipóteses, nomeadamente, de que o modelo que é adotado é o correto e que os erros existentes são normal e independentemente distribuídos com média zero e variância σ^2 . Todos estes pressupostos são assim verificados através da chamada Análise de Resíduos [79].

Os pressupostos e respetiva análise associada são os seguintes:

- Normalidade dos Resíduos: Para verificar este pressuposto é geralmente utilizado um gráfico de probabilidades da distribuição normal em função dos resíduos. O pressuposto é cumprido se o resultado for aproximadamente uma reta. Para além deste método, existem ainda inúmeros testes de normalidade que se podem utilizar.
- Homogeneidade dos Resíduos: De modo a confirmar este pressuposto é usualmente utilizado um gráfico dos resíduos em função dos valores previstos para os mesmos. Para estar de acordo com o pressuposto o resultado não deve apresentar nenhuma estrutura especial. De notar que um dos problemas mais recorrentes é relativo à existência de uma variância não constante, o que pode causar resultados com a forma de um "funil", no caso de a variância aumentar com o valor da observação. No caso de a variância não ser constante é de notar que se deve realizar uma transformação dos dados, sendo depois a análise de variância e respetivas conclusões aplicadas a estes dados transformados.
- Independência dos Resíduos: Por forma a confirmar este pressuposto é utilizado um gráfico dos resíduos em função do tempo, ou seja, em função da ordem em que as experiências foram efetuadas. De modo a cumprir com o pressuposto, o gráfico não deve evidenciar nenhuma tendência especial, por forma a concluir que não existe correlação entre os resíduos e os mesmos são independentes.

ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é feita toda uma caracterização detalhada acerca do estudo de caso da presente dissertação, analisando a unidade industrial, identificando e formulando o problema e introduzindo o produto e processos sobre os quais este estudo de caso se suporta.

4.1 Descrição da Unidade Industrial

A TE Connectivity (TE), sendo líder global em soluções de conectividade, sensores, e inúmeras outras tecnologias industriais, abrange essencialmente três segmentos: comunicações (eletrônica de consumo e sistemas de comunicação de dados); soluções industriais (em áreas como marinha, aeroespacial, aviação, militar, medicina, energia e indústria), e soluções de transporte (transporte industrial e comercial, aplicações automóveis e sensores).

A nível mundial, a TE é uma empresa com presença na América, na Europa e no Médio Oriente e na Ásia, com mais de 80 mil colaboradores em todo o mundo, contando com cerca de 8 mil engenheiros nas mais de 100 fábricas e centros de engenharia. Com esta estrutura, a TE é capaz de agregar um portefólio de produtos bastante diverso, que vai desde filtros, sensores, relés, antenas, cabos, conectores, fibra ótica, circuitos de proteção, aplicações aeronáuticas e espaciais, entre muitos outros, todos eles entre os cerca de 192 mil milhões de produtos produzidos anualmente que ajudam a transmitir energia, sinais e dados em variadas aplicações. Atualmente, a empresa demonstra um grande compromisso no que toca à eletrificação dos veículos, construindo uma variedade de produtos que permitem conectar quase todas as funções elétricas nos veículos.

A TE Portugal, pertencente ao setor fabril, encontra-se instalada em Évora, com as atuais instalações a ser fundadas em 1969 (pertencentes ainda à Siemens) e inauguradas em 1971. Em 1999, a fábrica passou a integrar o universo do que veria a ser a TE Connectivity. A empresa começou como produtora de aplicações elétricas múltiplas, sendo que hoje, a TE em Évora divide-se em 3 segmentos. O segmento de transporte (produtos automóveis como

inúmeros tipos de relés e contadores), o segmento industrial (relés para outras aplicações e sensores) e o segmento de apoio ao cliente, totalizando mais de 2 mil colaboradores.

Sendo o foco do segmento Automóvel da TE Connectivity Évora o fabrico de componentes eletrónicos como relés e contadores para aplicações automóveis, a empresa conta com mais de 40 linhas de produção para produzir principalmente relés de encaixe, relés PCB, relés de alta corrente e relés de alta tensão, incluindo contadores para automóveis. Assim, é possível completar as ligações que os clientes necessitam para tornar a mobilidade segura, eficiente e fiável, sob uma filosofia sustentável e de melhoria contínua.

4.2 Estratégia e Organização da Unidade

O segmento de transporte da TE Connectivity Évora tem um grande portfólio de produtos. Este, é composto maioritariamente por relés para automóveis (Relés Plug In, Relés PCB, Relés de Alta Corrente e de Alta Tensão), sistemas indutivos e sensores para automóveis.

Com uma gama de produtos assim, a organização consegue fornecer valor aos clientes no sentido de promover a transformação de ideias em tecnologia que pode transformar a forma como o mundo funciona e assim, concretizar a missão de fornecer uma experiência extraordinária aos seus clientes, criando um futuro mais seguro, limpo e conectado. O foco da organização passa também por garantir a fiabilidade e durabilidade dos seus produtos, trazendo inovação e realizando a visão da empresa de fornecer soluções rápidas e fiáveis para uma mobilidade sustentável [90].

Um fator em comum a todos estes produtos é a complexidade da sua produção, na medida em que se tratam de produtos bastante dinâmicos, com montagens que podem englobar dezenas de peças, passando por inúmeros tipos de processos como a bobinagem, soldadura, inserção, *press-fit*, cunhagem, estampagem, entre outros. A somar a isto, o estado de transformação em que se encontra o setor automóvel, direcionado cada vez mais para a mobilidade elétrica, leva a que a empresa tenha de concentrar esforços neste futuro, existindo já um grande foco naquilo que são os produtos de conexão de alta tensão como os contadores. Assim, é possível acompanhar o mercado com o crescente interesse e progresso que se verifica na tecnologia e infraestruturas subjacentes a esta temática. Para fazer face a esta alta procura por soluções de conectividade, a esta complexidade de produção, e às exigências de produtos menores, mais leves e mais fiáveis, é necessário estabelecer uma estrutura que seja bastante robusta [90].

Nesse sentido, esta unidade industrial é caracterizada por possuir uma integração total da produção, englobando tudo desde o desenvolvimento dos produtos, conceção das máquinas a utilizar na montagem, produção das peças, montagem dos relés, teste dos produtos, e soluções para responder aos requisitos dos clientes com uma estrutura responsável,

clara e apoiada a nível central. Para além disto, a fábrica não só compra como transforma muitas das matérias em componentes e peças, através de processos internos de galvanização, tratamentos, estampagem, injeção de plásticos (setor da fabricação de componentes). Esta integração de valências, ilustrada na figura 4.1, permite à organização um planeamento mais eficaz em termos organizacionais, permitindo definir e privilegiar as funções de suporte e apoio contínuas entre os diversos departamentos, promovendo a melhoria contínua das cadeias de valor.

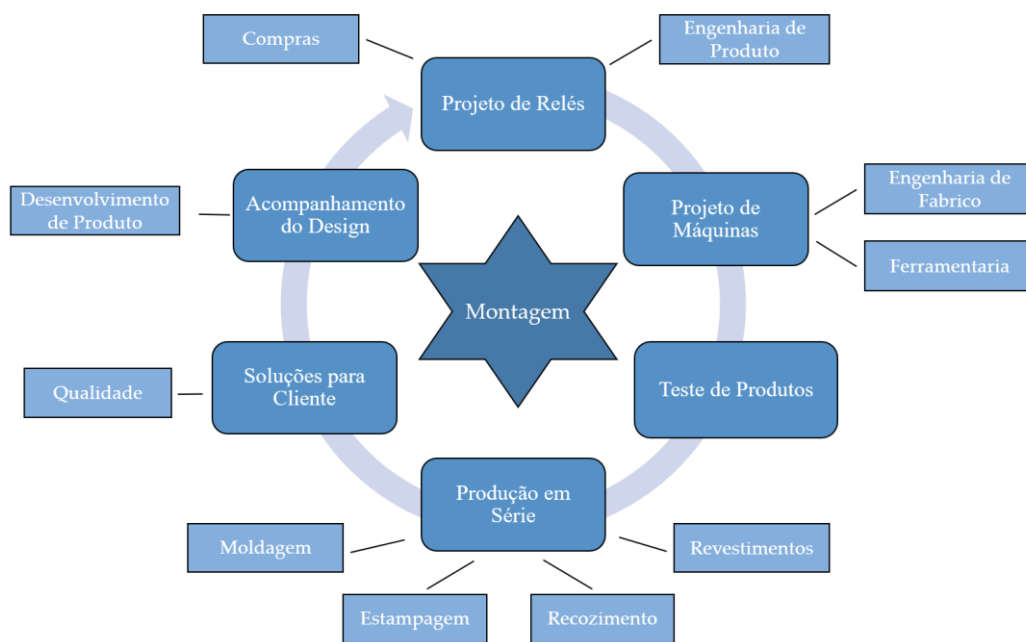


Figura 4.1 - Integração total das valências da TE Connectivity Évora

A nível de estratégia organizacional, sendo uma empresa que fornece componentes para o ramo automóvel segue e é certificada por modelos de gestão como a ISO 9001 (*International Organization for Standardization*), o EMAS 1836 (*Eco-Management and Audit Scheme*), a ISO 14001, a norma IATF16949 (*International Automotive Task Force*) e EN 9100 (*European Norm*). Desde modo a organização consegue agilizar e coordenar da melhor forma o controlo da sua produção, da sua qualidade, da sua gestão e dos seus impactos a nível ambiental.

O presente projeto foi inserido num departamento que é responsável por projetar, desenvolver e construir os processos, meios de fabrico e as linhas de montagem necessárias para o fabrico dos produtos. A equipa é responsável por toda a *overview* de projetos de industrialização tais como a construção de máquinas, o aumento da capacidade e desenvolvimento dos processos (duplicações, melhoria contínua, alterações, automatizações), a valida-

ção e parametrização dos processos, e todo o processo de aprovação de peças de produção, tal como definido pela *Automotive Industry Action Group* (AIAG). Sempre em contacto com todos os tipos de produtos, o departamento estrutura-se em várias equipas: Projeto mecânico, Projeto Elétrico, Engenharia de Montagem Mecânica, Sistemas de Teste e Engenharia de Projeto. O objetivo final acaba por consistir em levar os projetos da empresa ao sucesso, até à dita fase de fecho dos mesmos, na medida em que se entrega ao departamento de produção equipamentos e processos capazes de produzir de acordo com todos os requisitos estabelecidos.

4.3 Sistema de Validação

Um sistema de validação aplica-se quando é necessário realizar uma aprovação de um determinado processo ou *design*. O objetivo passa geralmente por garantir uma evidência estatística para a capacidade dos processos dentro da produção da empresa. Este estudo de capacidade acaba por consistir numa comparação entre aquilo que é a *Voice of the Customer* e a *Voice of the Process*, ou seja, comparar a variabilidade que se tem no processo com a devida especificação ou requisito do produto.

É possível descrever o estudo de capacidade nos seguintes 6 passos principais [91]:

- Passo 1: Garantir conformidade dos equipamentos de medição envolvidos com recurso à ferramenta MSA (*Measurement System Analysis*), de modo a garantir que se obtem de forma correta todos os dados que se necessita. No caso dos processos em estudo trata-se principalmente de garantir conformidade no equipamento de medição de curvas força-deslocamento.
- Passo 2: Definir as características e parâmetros críticos ao processo, muito com base no estipulado nos planos de controlo e realizar amostras (com uma prévia verificação da conformidade dos componentes envolvidos) e as respetivas medições, realizando os devidos controlos, se existirem. Estas ações dependem do objetivo da validação, sendo que a dimensão da amostra e frequência de amostragem são determinadas dependendo do produto.
- Passo 3: Verificar se o processo é estável, com o uso de Cartas de Controlo.
- Passo 4: Determinar qual é a distribuição em questão. Se os dados não forem normalmente distribuídos, deve-se investigar as razões subjacentes e, se necessário, realizar uma transformação dos dados utilizando a transformação de Box-Cox.
- Passo 5: Estimar métricas de capacidade do processo com 125 montagens do mesmo consecutivas, registando, no caso dos *press-fit*, a curva de força-deslocamento. Com estas montagens calcula-se a média, o sigma da máquina σ_m (desvio padrão da máquina) e define-se os LSC (Limite Superior de Controlo) e LIC

(Limite Inferior de Controlo) para a força e para o deslocamento caso o processo seja estável. Com isto, calcular os sigmas do processo ($\sigma_p = \sigma_m * 1,5$). Devem ser definidos também nesta fase janelas de controlo às curvas.

- Passo 6: Calcular as métricas de capacidade reais do processo de força e deslocamento. Obtêm-se produzindo amostras nos vários limites do processo. Tendo o LIE (Limite Inferior de Especificação) e o LSE (Limite Superior de Especificação), definidos na especificação de engenharia do produto, calcula-se LIE^- ($LIE - \sigma_p$) e LSE^+ ($LSE + \sigma_p$). Realiza-se 30 amostras em cada um destes 4 limites e 125 na nominal e calcula-se os índices de capacidade para força e deslocamento.
- Passo 7: Efetuar controlos de qualidade definidos em pelo menos 15 montagens para cada um dos anteriores 5 grupos, e confirmar conformidade. Em caso contrário, definir ações corretivas.

As métricas de capacidade são estabelecidas de acordo com o cliente ou, se não existir indicação, de acordo com as métricas da TE Connectivity, baseadas no standard da AIAG, estando definido um C_{mk} (Índice de Capacidade da Máquina) pelo menos maior ou igual a 1,67, válido para amostras com dimensões maiores ou iguais a 50, e um C_{pk} (Índice de Capacidade do Processo a Longo Termo), pelo menos maior ou igual a 1,33, válido para amostras com dimensões maiores ou iguais a 125.

Este sistema de validação permite assim confirmar e definir janelas de processo de acordo com as características dinâmicas existente e ainda contribuir para a definição de parâmetros do processo. Torna-se uma ferramenta muito essencial para o fluxo dos projetos do departamento, na medida em que garante que é possível aprovar determinado processo ou *design* para produção, evidenciando capacidade de produzir produtos em conformidade com a especificação de engenharia.

4.4 Descrição do Caso e Identificação do Problema

De entre os fatores que podem afetar o sucesso do sistema de validação apresentado no item anterior, a variabilidade surge como preocupação número um. A validação em questão consiste geralmente na análise de um único lote dos produtos, pelo que todo o procedimento tem por base as características de apenas esse lote de material.

No entanto, com o passar do tempo, é natural que surja variabilidade associada ao sistema, com o desgaste de peças da máquina, ferramentas, moldes, e associada a estes componentes, com o aparecimento de lotes que podem ser significativamente diferentes (com diferente média e tolerância intrínseca) do lote com o qual o processo foi validado. Isto, im-

possibilita assim a utilização dos limites de controlo e parâmetros validados, na medida em que a validação apenas satisfaz os requisitos para um lote de peças específico.

O facto de a validação ser realizada com apenas um lote deixa em aberto este tipo de situações, tirando robustez à mesma, na medida em que não é capaz de absorver variabilidade natural ao processo. Ao existir uma mudança nos componentes que entram para o processo, mesmo que seja dentro da especificação, torna-se difícil com os limites de controlo de processo definidos, averiguar a estabilidade do mesmo e controlar as variações naturais e permitidas que ocorrem num processo produtivo. Ao existir um desvio das condições geométricas dos componentes de entrada no processo existe a possibilidade de, com os limites definidos, ter-se a indicação de que o processo não está estável, apesar de o produto estar conforme e dentro dos limites de especificação. Na realidade o processo encontra-se estável, mas apenas com uma necessidade de reajuste dos limites de controlo, de acordo com as novas condições de *input*.

Uma das principais causas associadas à variabilidade que provoca a alteração das validações realizadas é a matéria-prima. Esta situação representa um problema, pois o processo perde eficácia na prevenção de situações de desperdício. Adicionalmente, é promovido o aparecimento de problemas de qualidade no produto, como a criação de partículas que afetam o funcionamento do mesmo, uma vez que os parâmetros de processo devem acompanhar estas alterações. Ainda, aquando da identificação desta variabilidade de matéria-prima, é necessário realizar uma revalidação que considere as novas condições, o que implica tempo e os respetivos custos associados.

4.5 Propostas de Melhoria

Deste modo, cria-se assim a necessidade de estudar e tentar prever em antemão o impacto da variabilidade geométrica dos componentes na estabilidade dos processos, com vista à criação de procedimentos de validação padronizados mais robustos quanto à variabilidade dos lotes de *input*.

Pretende-se assim definir e modelar a relação que existe entre a variabilidade geométrica dos componentes e a variabilidade das saídas do processo, mantendo as ferramentas, *design* e os parâmetros do processo sempre fixos. Assim, é possível determinar se uma melhor capacidade de prever o *output* traz valor ao procedimento de validação. Com um conhecimento mais profundo acerca do comportamento dos processos, baseado em vários lotes e assim incorporando mais variabilidade, é possível averiguar a utilidade de otimizar o procedimento e estudos realizados aquando de uma definição e validação de processo.

Ao definir e modelar os processos para toda a amplitude das tolerâncias é possível ter uma sempre uma estimativa, com alguma confiança, sobre o *output* do processo, ao dimen-

sionar (mesmo com base em amostras) os *inputs*. Isto, que permite uma mais rápida alteração de limites de controlo, evitando inúmeras iterações de validação. De notar que estes estudos, apesar de otimizados com o uso de vários lotes, também podem ser feitos com apenas um, em caso de limitações.

As melhorias propostas com este estudo são:

- Definição de variáveis críticas para os processos
- Capacidade de prever a falha que pode ocorrer devido a alterações de *input*
- Evitar iterações realizadas nas validações (capacidade de definir limites de controlo mediante o *input*), e os consequentes problemas associados.
- Relacionar, correlacionar e modelar processos semelhantes transversalmente
- Agilizar a definição de parâmetros e o desenvolvimento de processo, padronizando famílias de processos semelhantes

Apesar do Controlo Estatístico do Processo (SPC) estar implementado, como a variabilidade dos componentes é imprevisível, as ambições futuras passam pela implementação de um ciclo fechado onde o processo ajusta os limites de controlo por si mesmo com um controlador que relaciona e regula o *input* com o *output*. Neste tipo de controlo ótimo adaptativo seria necessária uma caracterização exaustiva de toda a matéria de entrada no processo (com recurso a sensores por exemplo), para que os limites fossem ajustados mediante essa informação, seguindo uma equação ou algoritmo que definiria a função de transferência associada.

Em paralelo, outra valência que surge cada vez mais no âmbito da previsão de processos é a simulação. Para além de todo o valor acrescentado que traz, a sua utilização facilita em muitas vertentes, nomeadamente em aspetos de restrições de material, quando não é possível simular na prática certas condições de processo. Pode revelar-se um desafio conseguir componentes nos seus limites máximos e mínimos de especificação, pelo que a simulação facilitaria em muito nestas situações.

O estudo que é realizado na presente dissertação pretende traçar o caminho para este objetivo final, começando por definir e caracterizar os processos (demonstrando as variáveis críticas), sendo que depois é feita uma modelação que permite prever os resultados dos mesmos. Assim, e ao mesmo tempo que se comprova as vantagens que advém deste tipo de modelos, permite-se ainda a possibilidade de uma evolução contínua destas mesmas modelações, com recurso a mais informação ou mesmo a outras valências tecnológicas.

4.6 Análise do Produto - Contator EVC 175

Com evolução da mobilidade elétrica, é possível verificar um aumento muito significativo do volume de negócios de contadores. Esta procura leva a que seja necessário aumentar a capacidade de produção, pois não só surgem mais variantes dos produtos, com determinados requisitos específicos de clientes, como mais quantidades requeridas, o que propicia a existência de mais linhas de produção e maior complexidade de industrialização.

Tendo isto por base, apesar de a TE Connectivity fabricar muitos tipos de relés, a família de produtos sobre a qual a presente dissertação se vai debruçar tem o nome de EVC (*Electric Vehicle* Contator). Sendo produtos ainda em constante desenvolvimento, com uma grande necessidade de automatização, com muitos tipos de processos e materiais, e com uma significativa variabilidade associada à geometria das peças, a padronização torna-se um grande desafio.

Dentro desta família de produtos existem vários modelos, com várias versões, cada uma com a sua aplicação e propósito específico (capacidade para maior tensão, maior número de bobinas, maior capacidade de corte de corrente, dimensão e aplicação física no cliente diferente, entre muitas outras características). Na figura 4.2 é possível observar 4 versões de EVC.

Trata-se de um produto que expande o portfólio de contadores de elevada potência da TE. Existem dois tipos principais, o EVC 250 e o EVC 175. Este último é um contator compacto de alta tensão DC (até 450VDC) dirigido para aplicações em veículos híbridos, totalmente elétricos com bateria completa e também carros *fuel-cell*, inseridos na categoria de média potência, bem como para sistemas de carregamento de baterias DC de veículos. Nas figuras 4.3 e 4.4 é possível ver uma ilustração da aplicação de um contator EVC num veículo elétrico. Apesar de o foco do presente trabalho ser o EVC 175, as ilustrações mais elucidativas disponíveis neste caso são do EVC 250. Na figura 4.4 é possível notar que é usada uma combinação de contadores na interface entre a bateria de tração e a rede elétrica do quadro e respetivo motor elétrico, constituindo assim uma separação galvânica entre o armazenamento de energia e o sistema de tração elétrico, que permite segurança tanto ao desligar como em casos de falha [92].



Figura 4.2 - 4 versões distintas do produto EVC (adaptado de [92])

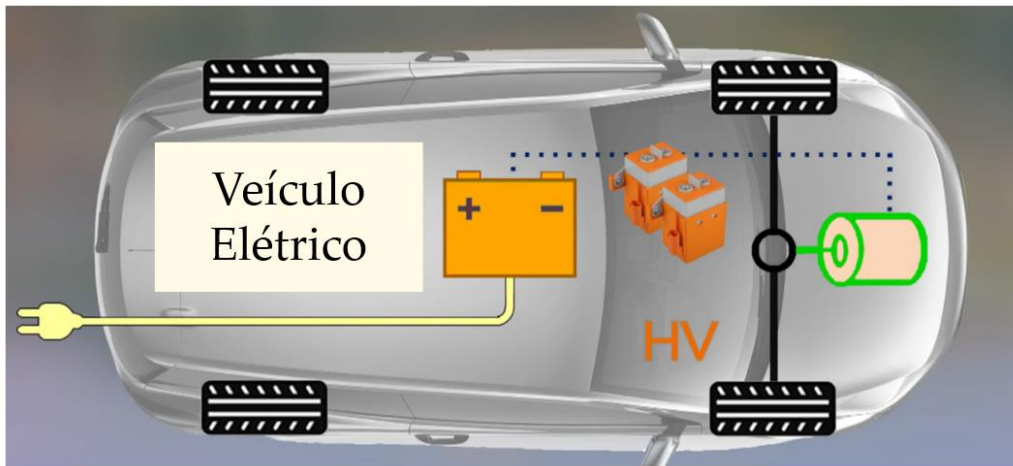


Figura 4.3 - Esquemática macro de um exemplo de aplicação de um contator EVC 250 num veículo elétrico (adaptado de [92])

Consistindo num produto totalmente baseado na tecnologia comprovada do contator EVC 250, também da TE, o mais recente contator, EVC 175, apresenta uma corrente contínua de 175A (a 85° C) e uma capacidade de curto-circuito de correntes de transporte de 5kA (com capacidade para 20ms deste pico máximo). Apesar de ser destinado a sistemas de alta tensão, o contator não requer enchimento de gás inerte ou vedação hermética da câmara de contato, garantindo o corte seguro de correntes de até 2000 A, mesmo em altitudes de 5500 metros acima do nível do mar. O contator foi desenhado especialmente para aplicações em espaços de montagem apertados, sendo esta a grande vantagem em relação ao EVC 250, tendo dimensões gerais de apenas 70,3 x 50,9 x 34,3 mm. Na figura 4.5 é possível ver duas perspetivas do contator em questão.

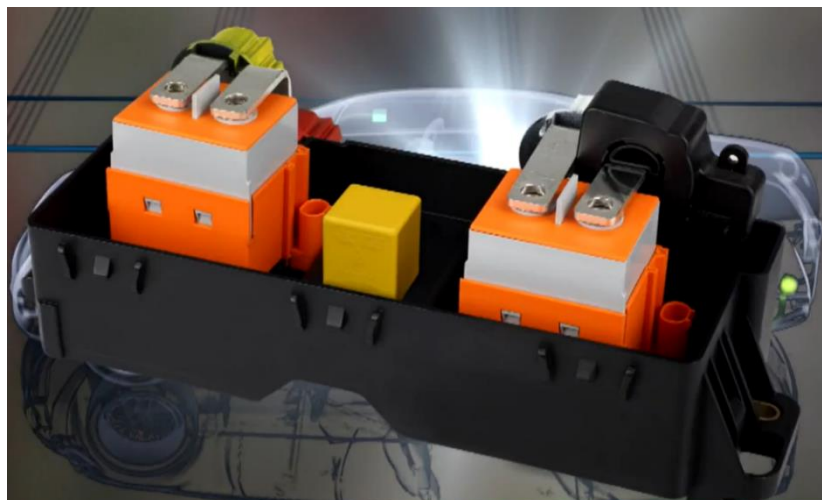


Figura 4.4 - Esquemática micro de um exemplo de aplicação de um contator EVC 250 num veículo elétrico (adaptado de [92])

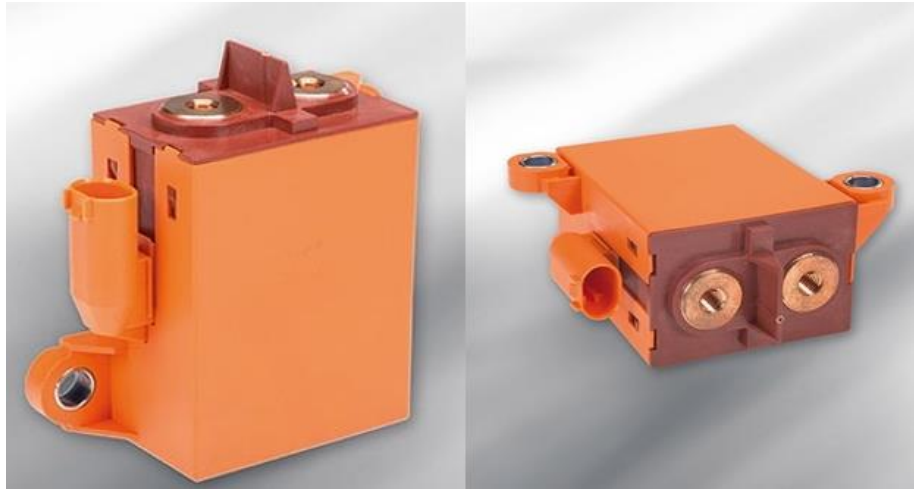


Figura 4.5 - EVC 175 (adaptado de [93])

Este modelo de contator, tal como todos os outros, tem de cumprir com requisitos mecânicos como forças (de molas, de contactos, entre outras) e distâncias (entre componentes como contactos, ou entre núcleo e armadura, ou de determinadas molas, entre outras) e também com requisitos elétricos (resistências, tempos e tensões de operação de não operação, tensão nominal entre outros). Aqui, a tensão de operação representa a tensão a partir da qual tem de haver comutação no relé, e a tensão de não operação a tensão a partir da qual o relé deve voltar ao estado original. A tensão nominal representa a tensão alvo durante o funcionamento do relé.

Em paralelo, é requerido que estes dispositivos sejam desenhados de forma comportarem a sua função de comutar cargas de elevadas potências em condições adversas. Na figura 4.6 é possível ver um contator em ação (corte de corrente neste caso), com o arco elétrico a ser provocado pela comutação de tensões extremamente elevadas.

As principais características diferenciadoras destes contatores para os relés mais convencionais passam por: maior distância de contactos; contactos mais altos, maior câmara de contactos e maior bobina. Devido ao facto de o produto ter de suportar altas tensões, é necessário que possua estas características, por forma a separar tensões elevadas e resistir aos choques e arcos elétricos. Nas figuras 4.7 e 4.8 é possível analisar em detalhe a composição típica destes contatores. Na figura 4.7 é possível verificar o efeito e sentido da corrente nos contactos tanto para a carga como para a descarga de uma bateria [93].

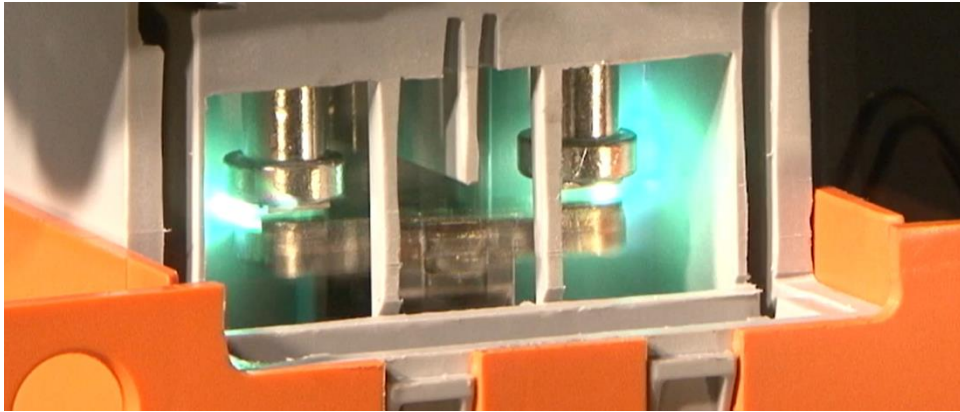


Figura 4.6 - Arco elétrico verificado durante a comutação do contator (abertura dos contactos, com fonte [92])

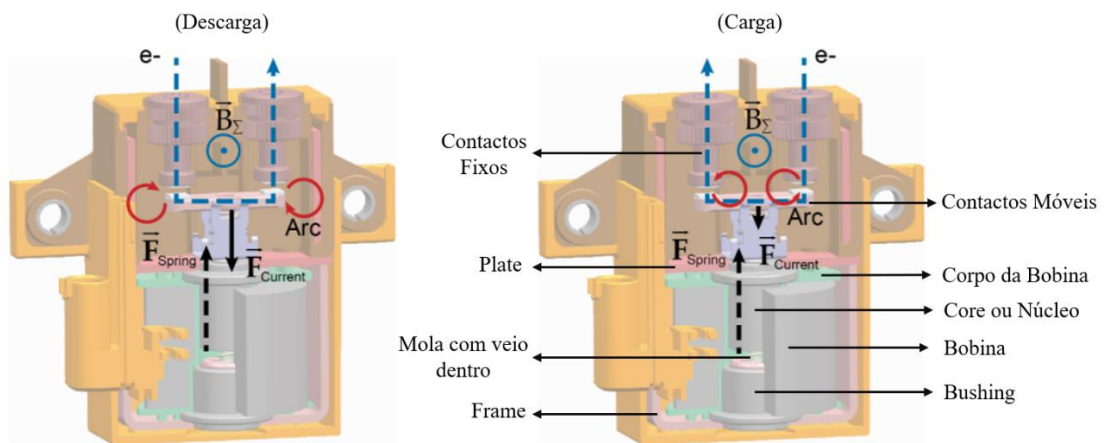


Figura 4.7 - Vista de *core* de um EVC 250 (carga e descarga) com alguns componentes identificados ([92])

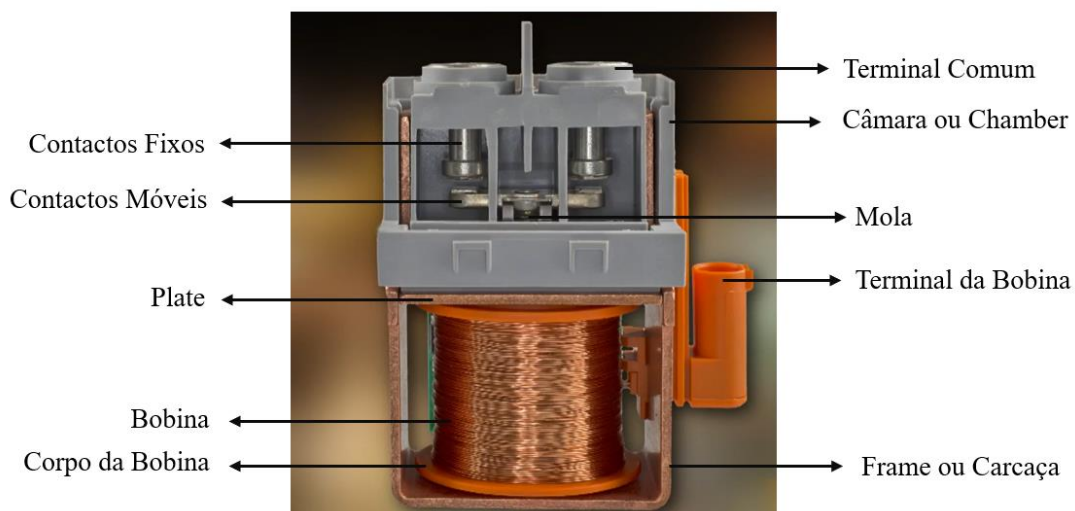


Figura 4.8 - Vista de corte de um EVC 250 com alguns componentes identificados (adaptado de [92])

4.7 Análise dos Processos

Tendo por base as propostas de melhoria enunciadas, e introduzido o produto sobre o qual esta dissertação se baseia, são estudados 2 processos da fabricação do EVC 175, o produto mais recente de entre os dois tipos de EVC.

Na produção de contadores e relés em geral, existe uma constante necessidade de ter conexões sólidas entre diferentes componentes metálicos. Um tipo de processo que se destaca como um dos mais utilizados é o *press-fit*. Assim, e tendo em conta que o objetivo passa também por relacionar e comparar processos no sentido da padronização, escolhe-se 2 processos cujos princípios são muito semelhantes. Os processos em questão são o P06, onde ocorre o *press-fit* do *Core* na *Plate*, e o P01/02 onde ocorre um *press-fit* entre as peças denominadas *Bushing* e *Frame*, ao mesmo tempo que ocorre uma calibração das abas da *Frame*.

Ambas as conexões possuem funções do tipo Magnético-Mecânicas, no sentido em que não só encapsulam o campo magnético como servem também para a realização de algumas funções mecânicas de fixação. Deste modo, o fator mais crítico nestes dois processos é a área de contacto, uma vez que a não conformidade destas conexões afeta diretamente a qualidade de algumas conexões elétricas fulcrais.

Em ambos os processos, se houver folga entre os componentes corre-se o risco de afetar o campo magnético, não ficando com a intensidade suficiente e influenciando o funcionamento do relé, na medida em que os contactos podem já não fechar se não existir força magnética suficiente. No caso do processo P06, o núcleo representa o elemento que, dentro da bobina, potencia o campo magnético, pelo que é bastante importante estar na posição correta. Já no caso do processo P01/02, o *Bushing*, para além de guiar o campo magnético para dentro do contator, é ainda responsável por guiar no seu interior a armadura. Caso existam desvios e este componente não se encontre perpendicular à *Frame*, a fricção entre o mesmo e a armadura irá aumentar podendo criar partículas e afetar a conexão elétrica.

Em ambos os processos o objetivo passa assim por garantir uma conexão mecânica, magnética e elétrica entre dois componentes. A mecânica de montagem dos processos é muito semelhante, garantindo a fixação devido à elasticidade e consequente recuperação elástica dos materiais após a inserção, como se pode observar nas esquemáticas e respetivo desenho de montagem presentes nas figuras 4.9 e 4.10. A força do punção é realizada ora no topo do *Core* ou no topo do *Bushing*, com a particularidade de que no P01/P02 existem ainda 2 punções laterais responsáveis por calibrar as abas da *Frame*. Este ponto introduz uma variabilidade significativa em relação ao P06, onde a força exercida é apenas para o *press-fit* em questão. Ambos possuem centralizadores e apoios que permitem evitar deformações não desejadas no material.

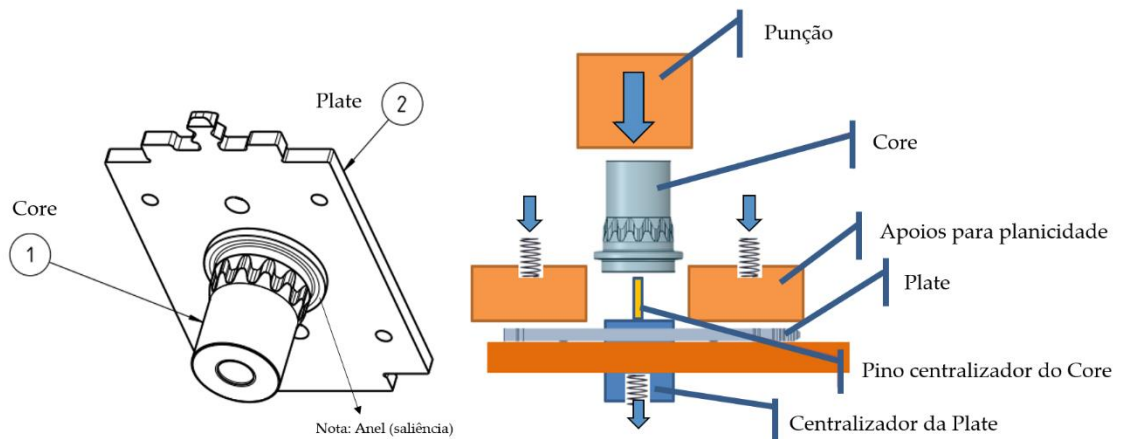


Figura 4.9 - Desenho e esquema com vista de corte lateral do Processo P06

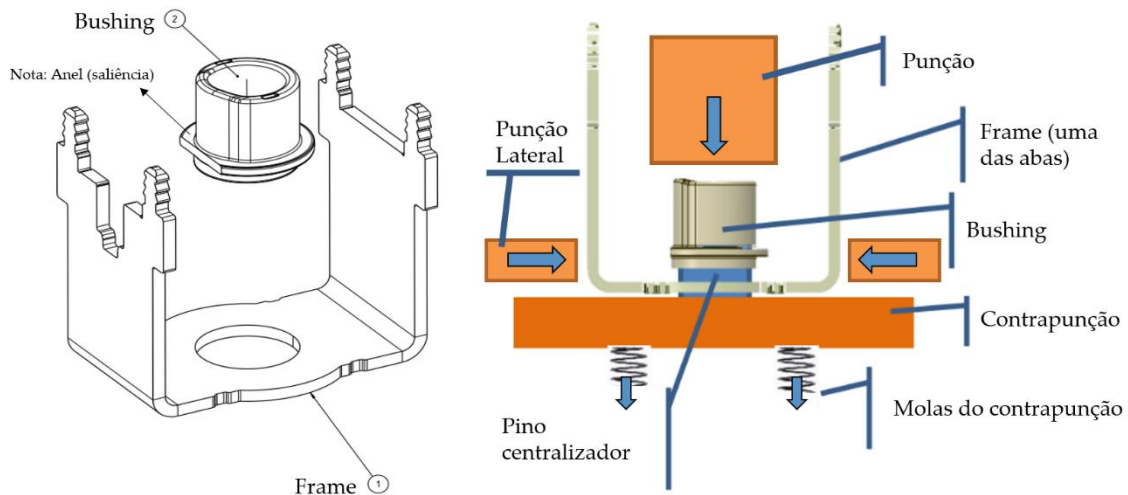


Figura 4.10 - Desenho e esquema com vista de corte lateral do Processo P01/02

4.7.1 Funcionamento dos Processos

O controlo deste processo é feito principalmente com o recurso a curvas de força-deslocamento (controlo a 100%), através da interface das prensas elétricas utilizadas. Os tipos de prensas utilizadas possuem vários perfis de montagem. Os principais perfis são: perfil de força, perfil de deslocamento e perfil de declive. No perfil de força é definido um valor de força onde se garante que se essa força for atingida, a montagem fica conforme. No perfil de deslocamento é definido uma coordenada que garante que se esse curso for realizado, a montagem fica conforme. Já o perfil de declive consiste num *press-fit* onde a prensa inicia o curso e para apenas se: encontrar um valor de declive da curva igual ou superior ao definido; ou ultrapassar os limites de segurança definidos tanto para força como para segurança. A

nível de segurança é um bom perfil na medida em que independentemente de a força ou deslocamento máximo não terem sido atingidos, a prensa para e retorna, ao detetar um declive de curva igual ou superior ao definido. Em sistemas onde não seja necessário este nível de proteção, pode tornar-se difícil de usar, uma vez que se a curva do processo não for muito estável incorre-se em muitas paragens por falso alarme.

Tanto na P06 como P01/02 são usados o perfil por deslocamento, sendo muito comum neste tipo de processos. Em caso de muita variabilidade nos *inputs*, é prudente averiguar uma alteração para o perfil de força, de modo a acomodar as variações do material.

Trata-se assim de prensas com recurso a células de carga, configuradas para evitar ao máximo a deformação plástica destes materiais. Fatores como a geometria das peças e das ligações mecânicas, as propriedades intrínsecas dos materiais, a geometria das ferramentas utilizadas, a força, e a velocidade, definem a forma como estes processos devem ser conduzidos.

Estas prensas elétricas, de fuso elétricas possuem várias funções de controlo, tais como:

- Definir cursos ou forças máximas que a prensa não ultrapassa
- Definir cursos ou forças relativas à variabilidade do material, sendo estes parâmetros contabilizados após deteção do componente apenas
- Programação pormenorizada da velocidade em todo o curso da prensa (velocidades de aproximação lentas e de retorno rápidas)
- Programação do tempo de *press-fit*, na força ou deslocamento definido, antes do retorno do punção (definido com propriedades elásticas dos materiais)
- Função de deteção de declive, onde é possível definir o retorno do punção após o aparecimento de um determinado aumento em força na curva
- Definição de janelas de tolerância onde as curvas de processo devem passar e/ou não devem passar, de forma a garantir um produto conforme. Estas janelas podem ser programadas pela forma de linhas ou áreas estipuladas. A unidade de controlo controla ativamente estas regras e emite avisos de não conformidade.
- Compensação dinâmica de deflexão - eliminação dos efeitos das propriedades elásticas do sistema inteiro (máquina, ferramenta, componentes)

Na figura 4.11 é possível analisar uma caracterização da curva força-deslocamento do P01/02, onde é realizado um estudo de modo a definir zonas, exemplos de janelas de controlo e perceber o *output* de curva associado a situações não conformes de montagem. Na figura 4.12, é feito o procedimento idêntico para o P06, sendo que aqui já não é forçada a presença de situações não conformes, pois possuem um comportamento idêntico à do P01/02.

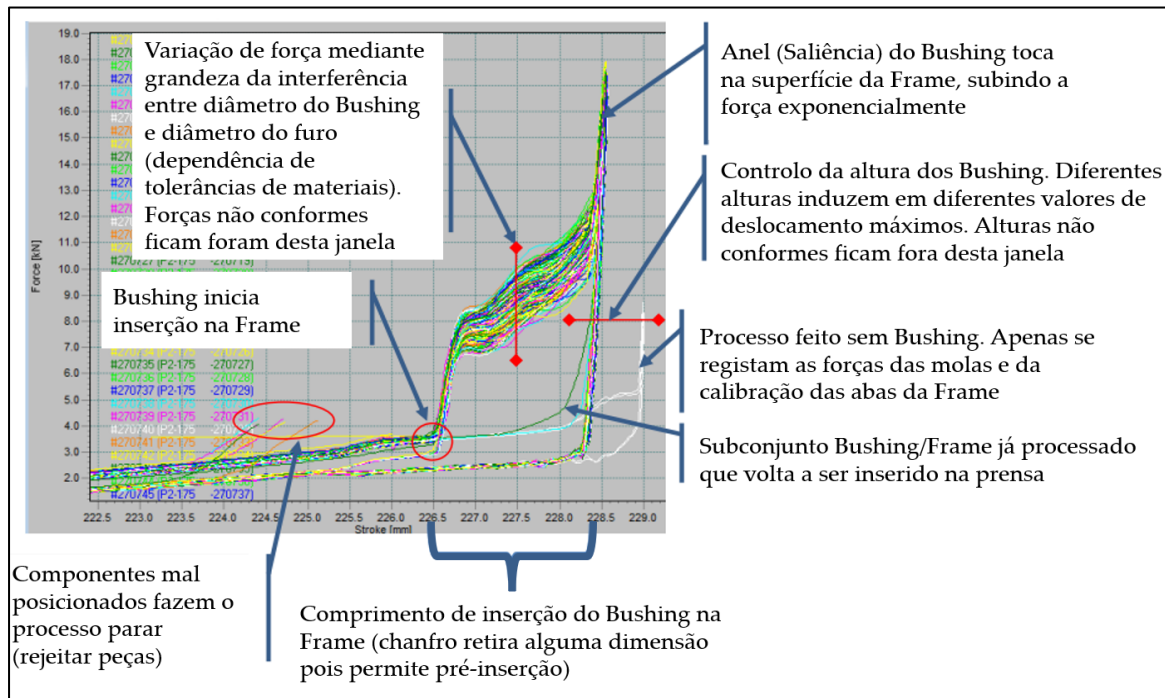


Figura 4.11 - Caracterização da curva força-deslocamento do P01/02 (definição de zonas, exemplo de janelas de controlo, ilustração de situações não conformes)

Tendo em consideração a interpretação das curvas, que ajuda a explicar e ler as várias fases do processo, e todas estas situações de não conformidade ilustradas, deve ser feito um esforço para controlar e evitar a ocorrência de não conformidades. Para esse efeito são implementadas ferramentas de controlo de qualidade, impostas através da monitorização destas curvas de processo, concretizados através de janelas como as representadas a vermelho nestas figuras, cuja funcionalidade é detalhada na subsecção 4.7.2.

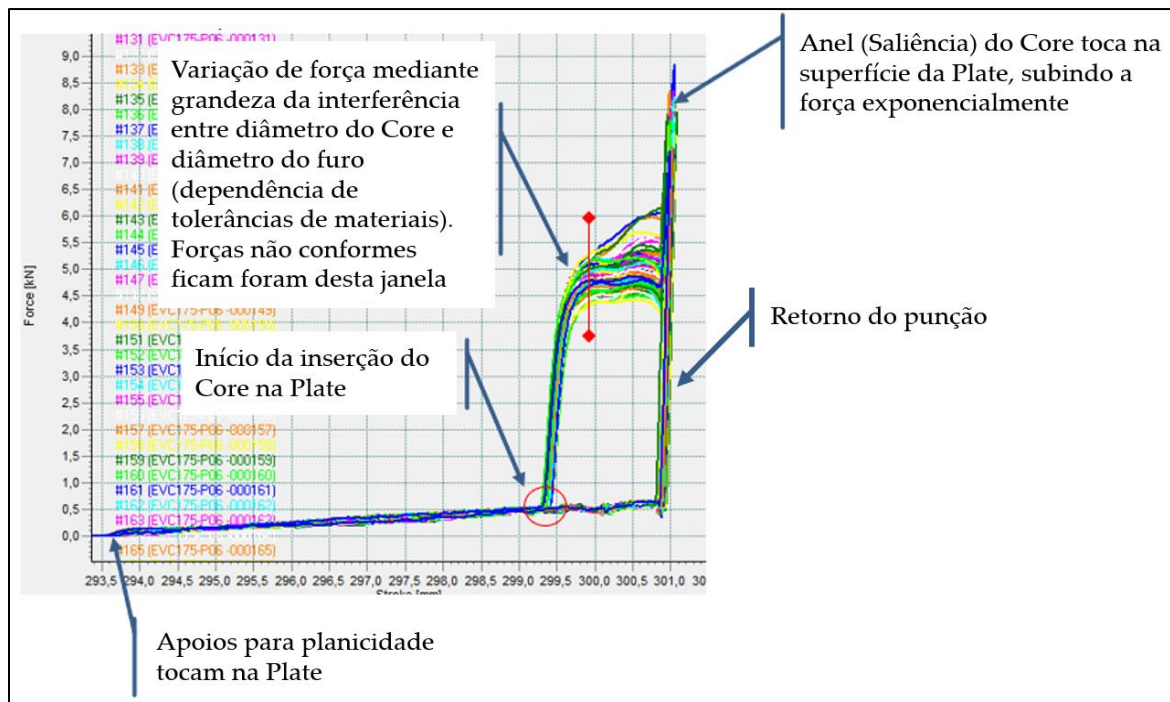


Figura 4.12 - Caracterização da curva de força-deslocamento do P06 (definição de zonas e exemplo de janelas de controle)

4.7.2 Requisitos e Controlos dos Processos

É possível fazer a verificação dos processos de um contator com base em requisitos visuais, dimensionais, mecânicos (como forças de retenção) e de funcionamento (como resistências, condutividade elétrica, polaridade magnética, entre outros).

Quanto aos dois processos em estudo, estes têm controlo em tempo real a 100% das curvas de força-deslocamento, onde são definidos limites de controlo (janelas). Neste caso consistem em retas, presentes no gráfico, por onde as curvas devem passar para garantir um produto conforme. Essas retas são definidas tal como estabelecido na tabela 4.1. Caso este requisito não seja cumprido, é dado um sinal automático pela prensa a indicar que essa montagem é não conforme e deve ser descartada. É possível argumentar que este controlo de força-deslocamento consiste no mais significativo, uma vez que acaba por englobar avaliações realizadas também em vários outros tipos de controlo. Isto, também devido ao facto de as exigências requeridas por este controlo implicarem que a montagem efetuada é conforme na grande maioria dos requisitos.

Tabela 4.1 - Definição das retas de controlo das curvas de força-deslocamento

	Nome	Processo P06		Processo P01/02	
		Coordenadas X (mm)	Coordenadas Y (kN)	Coordenadas X (mm)	Coordenadas Y (kN)
Tipo de	Linha Y	-	-	68,013 a 68,638	4
Controlo	Linha X	140	3,2 a 9	67,5	3,7 a 8

Sendo assim, tem-se 1 reta para o controlo do Processo P06 e 2 retas para o controlo do Processo P01/02. Para além deste controlo, estes 2 processos são sujeitos, periodicamente, aos controlos presentes na tabela 4.2 e 4.3. Estes controlos adicionais periódicos, realizados com base em amostras, são muito semelhantes em ambos os processos, constituindo controlos que devem ser realizados apenas depois de formação adequada para tal. De realçar ainda que, de entre os seguintes controlos de qualidade, apenas a Força de Retenção e a Planicidade geram variáveis contínuas, ao contrário dos restantes controlos atributivos.

Tabela 4.2 - Controlos periódicos realizados ao Processo P06

	Processo P06		
	Nome	Especificação	Meio de Inspeção
Características Visuais	Folga entre <i>Core</i> e <i>Plate</i>	Folga entre o <i>Core</i> e a <i>Plate</i> $\leq 0,04$ mm	Calibre específico (OK/NOK)
	Posição e forma do <i>core</i> depois de <i>press-fit</i>	Isento de fissuras e deformações	Visual
	Integridade do <i>Core</i> / <i>Plate</i>	Sem rebarbas	Visual
Características Dimensionais e Mecânicas	Fixação do <i>Core</i> na <i>Plate</i>	Força de retenção ≥ 100 N	Dispositivo de teste de ensaios à tensão e compressão
	Planicidade da <i>Plate</i>	Planicidade entre 3 pontos definidos $\leq 0,05$ mm	Comparador + Dispositivo específico

Tabela 4.3 - Controlos periódicos realizados ao Processo P01/02

Processo P01/02			
	Nome	Especificação	Meio de Inspeção
Características Visuais	Posição e folga entre <i>Core</i> e <i>Plate</i>	Folga entre o <i>Core</i> e a <i>Plate</i> $\leq 0,04$ mm	Calibre específico (OK/NOK)
	Integridade da <i>Frame</i> e do <i>Bushing</i> depois do <i>press-fit</i>	Isento de fissuras e deformações. <i>Bushing</i> encosta de forma plana na <i>Frame</i> e sem rebarbas	Visual
Características Dimensionais e Mecânicas	Fixação do <i>Bushing</i> na <i>Frame</i>	Força de retenção ≥ 50 N	Dispositivo de ensaios à tensão e compressão
	Paralelismo da <i>Frame</i> ; Centramento da <i>Frame</i> com o <i>Bushing</i> ; Diâmetro interno do <i>Bushing</i> após <i>press-fit</i>	Diâmetro interno do <i>Bushing</i> $11,065 \pm 0,055$ mm	Calibre específico (OK/NOK)
	Perpendicularidade e paralelismo das paredes laterais	$40,15 \pm 0,1$ mm	Calibre específico (OK/NOK)

Estes controlos, apesar de no dia a dia da produção destes produtos serem controlados apenas com base em amostras retiradas periodicamente ao longo do turno, no presente estudo vão ser controladas a totalidade das montagens, por forma a recolher o máximo de informação e conhecimento possível sobre o processo. Esta recolha de informação acerca de características visuais, dimensionais e mecânicas permite também averiguar e constituir a lista de respostas dos processos que são modeladas neste projeto.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Uma forma importante de ganhar conhecimento acerca de processos na indústria é através da experimentação. Para isso, torna-se fundamental estabelecer um procedimento experimental.

Neste capítulo é feita uma caracterização detalhada acerca dos componentes envolvidos e das respectivas propriedades dos mesmos, na ótica de uma recolha de conhecimento que permita uma interpretação mais completa dos processos em questão. Apresenta-se ainda a definição e execução do plano de recolha de amostras dos componentes, bem como algumas limitações e pressupostos considerados.

5.1 Caracterização dos Componentes

Com a evolução do mercado dos relés para automóveis, os requisitos tornam-se cada vez mais apertados nestas indústrias, nomeadamente a da eletrónica industrial. Em paralelo, estes tipos de produtos vão tendo desafios de projeto cada vez mais ambiciosos. As especificações técnicas são cada vez mais complexas no âmbito da otimização tanto do produto como do espaço e peso associado, o que requer um esforço de engenharia maior. Por estas razões, torna-se cada vez mais importante realizar uma seleção de materiais e componentes ótima, e uma boa definição de especificações dos mesmos, dada a complexidade exigida pela fabricação destes produtos [47].

Como abordado, o estudo vai ser realizado acerca de dois processos, de nome P06, onde ocorre um *press-fit*, ou seja, um encaixe mecânico por interferência, entre as peças denominadas *Core* e *Plate* e P01/02, onde ocorre um *press-fit* entre as peças denominadas *Bushing* e *Frame*, ao mesmo tempo que ocorre uma calibração das abas da *Frame*.

A *Plate*, do processo P06, responsável por ajudar a fechar e tornar mais estável o campo eletromagnético no circuito de bobina do contator, está representada na figura 5.1.

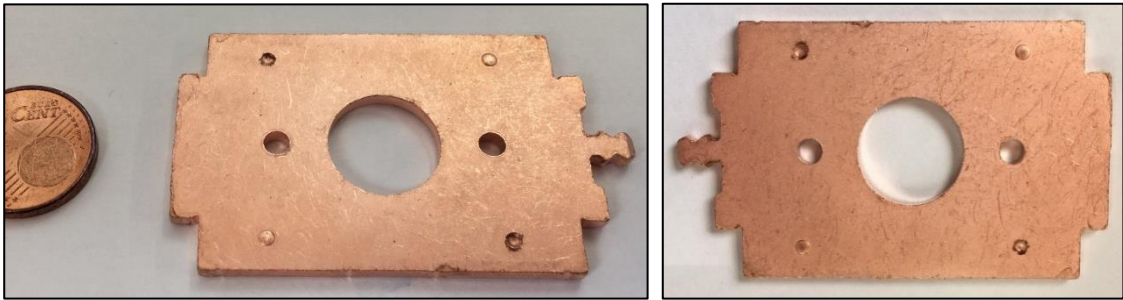


Figura 5.1 - Plate (Processo P06)

O *Core*, do processo P06, responsável por magnetizar e assim atrair outros componentes através da força magnética gerada pelo solenoide criado pelo mesmo, está representado na figura 5.2.



Figura 5.2 - Core (Processo P06)

A *Frame*, do processo P01/02, responsável por ajudar a concentrar o campo eletromagnético, tornando-o mais estável, está representada na figura 5.3.

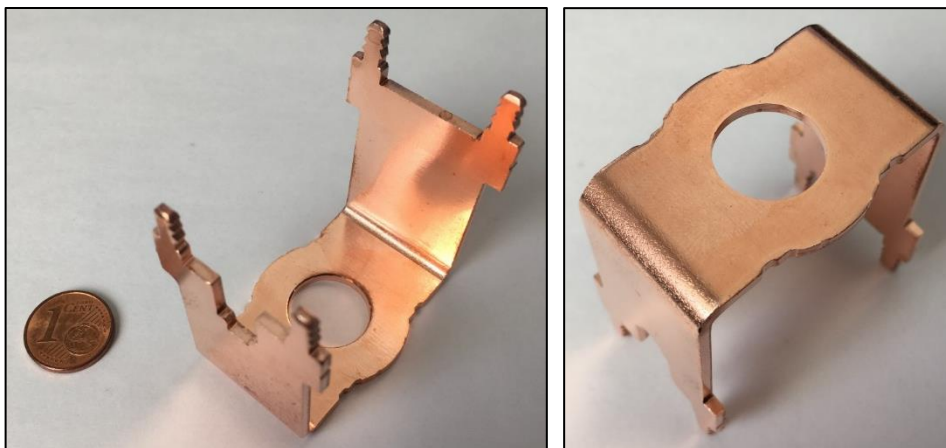


Figura 5.3 - Frame (Processo P01/02)

O *Bushing*, do processo P01/02, responsável por guiar o campo magnético para dentro do mesmo e guiar o movimento de outros componentes, está representado na figura 5.4.



Figura 5.4 - Bushing (Processo P01/02)

Estes dois processos de *press-fit* constituem, como se estuda no item 2.2, funções muito importantes no contator, na medida em que são responsáveis por fechar o circuito magnético que, ao intensificar, permite o movimento da armadura em direção ao núcleo, fechado assim os contactos, no caso de um relé de fecho. De notar que este movimento é guiado pelo *Bushing*. Sendo assim, é muito importante garantir que não existe folga entre as peças após a sua montagem, de modo a não afetar a funcionalidade do relé, uma vez que o ar constitui um dielétrico.

Todas estas peças são produzidas por fornecedores, podendo existir alguma variabilidade em relação à empresa em específico que as fornece. Estes fornecedores, tal como todos os outros, possuem um plano de controlo para todas estas peças, sendo que este inclui principalmente os requisitos a nível de capacidade de determinadas cotas definidas como críticas para o processo, para as quais é obrigatório que existam controlos amostrais.

Importa então realizar um estudo acerca das propriedades destas peças e materiais que podem eventualmente afetar o processo.

5.1.1 Revestimento das peças

Todas as peças referentes aos processos em questão possuem um revestimento de superfície, cuja função é alterar as propriedades técnicas e físicas da superfície das peças, no sentido de melhorar a sua durabilidade, aparência e desempenho. Deve ser feito de forma controlada, uma vez que pode afetar a funcionalidade do contator. Um revestimento em demasia em cobre, por exemplo, pode enfraquecer o campo magnético do contator. Uma descrição detalhada acerca do revestimento das peças pode ser observada na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Material e respetivo revestimento aplicado a cada uma das peças

	Processo P06		Processo P01/02	
	<i>Core</i>	<i>Plate</i>	<i>Bushing</i>	<i>Frame</i>
Material da Peça	1.1015 St. DIN 17405 – Rfe60			
Material e Dimensão do Revestimento	3-5 μm de Níquel sobre 1-3 μm de Cobre (total de 4-8 μm)	3-6 μm de Cobre	15-20 μm de Umicore Miralloy 3849 (CuSn10)	3-8 μm de Cobre

De modo a exemplificar a construção da tabela 5.1 pode-se analisar o exemplo do *Core*. Pelas indicações presentes no desenho desta peça, verificou-se que o revestimento de cobre contribui com 1 a 3 micrómetros para as referidas dimensões, sendo que o revestimento de níquel sobrejacente a esse contribui com 3 a 5 micrómetros. Deste modo, o tratamento de superfície completo desta peça leva que as especificações de desenho sofram um aumento entre 4 a 8 micrómetros.

É possível constatar que o material da peça corresponde a uma norma destinada a um tipo de aço destinado principalmente para o fabrico peças e materiais magnéticos para relés. Os valores tabelados são todos referentes, como seria de esperar, a adições pós recozimento. Analisando em detalhe os compostos destes revestimentos é possível resumir as suas propriedades e vantagens na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Material de revestimento e respetivos usos e vantagens

	Material de Revestimento		
	Cobre	Níquel	Umicore Miralloy 3849
Uso / Vantagens	Alta condutividade, para fechar o campo magnético	Alta resistência à corrosão (superior à do cobre) e ao desgaste	Material duro, resistente
	Metal pouco duro, com alta fiabilidade de adesão do revestimento	Excelente base para revestimentos adicionais	Boa condutividade
	Boa resistência à corrosão	Boa resistência ao calor	Boa resistência à corrosão e ao desgaste
	Excelente base para revestimentos adicionais	Proporciona um acabamento atrativo e brilhante	Propriedades de material deslizantes, adequadas para o movimento da armadura do relé

É de notar que este revestimento vai influenciar as dimensões das cotas. Sendo que nos desenhos de projeto destas peças as dimensões são indicadas sem contabilizar com o revestimento, é necessário considerar esta adição nos estudos. De modo a caracterizar as peças realizou-se um estudo acerca das interferências que podem existir nos 2 processos (tabela 5.3). Os diâmetros a que se refere consistem nos diâmetros principais das peças, sendo nas peças com o furo o diâmetro do furo e nas peças cilíndricas o diâmetro da zona de interferência.

Tabela 5.3 - Cálculo das interferências entre componentes nos processos

	Processo P06				Processo P01/02			
	Diâmetro <i>Core</i>		Diâmetro do furo da <i>Plate</i>		Diâmetro <i>Bushing</i>		Diâmetro <i>Frame</i>	
	Mín. (mm)	Máx. (mm)	Mín. (mm)	Máx. (mm)	Mín. (mm)	Máx. (mm)	Mín. (mm)	Máx. (mm)
Peça Virgem	12,62	12,70	12,55	12,61	14,73	14,87	14,645	14,705
Revestimento	0,004	0,008	0,003	0,006	0,015	0,020	0,003	0,008
Peça Final	12,628	12,716	12,538	12,604	14,76	14,84	14,629	14,699
Interferência Mínima	12,628 - 12,604 = 0,024				14,76 - 14,699 = 0,061			
Interferência Máxima	12,716 - 12,538 = 0,178				14,84 - 14,629 = 0,211			

Quando se realiza o cálculo do diâmetro da peça final é necessário ter em conta que por exemplo, no caso do *Core* e do *Bushing*, tratando-se das peças cilíndricas que inserem, o revestimento vai adicionar o seu valor duplamente, por existir ao redor de toda a peça. No caso da *Plate* e da *Frame*, ao diâmetro em questão, como já é referente a um furo, o revestimento vai retirar dimensão ao diâmetro do furo, também duplamente. A interferência mínima representa assim teoricamente a situação de mais fácil inserção, e a máxima a situação de mais difícil inserção.

5.1.2 Tensões internas e Coercitividade

As tensões internas são geradas quando um objeto é tensionado para além do seu limite elástico, resultando em deformação plástica. Devem ser controladas, uma vez que podem potenciar o aparecimento de falhas e causar nos componentes uma certa desregularização estrutural. Materiais como o aço são cada vez mais utilizados em áreas como a do trans-

porte, medicina e eletrónica, tornando a sua maquinação um desafio cada vez mais exigente [94].

No caso concreto do *Bushing* e do *Core*, estas peças são feitas através de *cold forming*, sendo essa a razão por detrás da sua geometria, não simétrica, no caso do *Bushing*. Sendo assim, é uma propriedade a ter em atenção nas peças em uso.

Ao fazer um recozimento às peças são assim diminuídas as forças internas e também é facilitada a passagem de campo magnético, diminuindo assim também as forças coercitivas. Trata-se por isso de um processo muito importante, uma vez que no caso de os componentes em questão possuírem um excesso de dureza, associado a um recozimento deficiente, ter-se-á uma maior resistência do circuito magnético. Estas forças coercitivas (normalmente medidas em A/m), tanto maiores quanto maior forem as tensões a que a peça é sujeita, consistem numa medida da capacidade de um material ferromagnético para resistir a um campo magnético externo sem ficar desmagnetizado. Na perspetiva inversa, consiste na intensidade de um dado campo magnético externo aplicado que é necessário para desmagnetizar completamente um material [95]–[97].

Quanto maior forem as forças coercitivas maior dureza terá o material, ou seja, menos flexível e maleável. Adicionalmente, este valor não deve ser muito elevado uma vez que não deve influenciar o campo magnético que irá existir à volta com o relé em funcionamento. Constituem por isso um parâmetro a controlar nas peças em questão, sendo medidas após os respetivos recozimentos, cujas especificações se podem analisar na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Especificação de força de campo coercitivo das peças

	Processo P06		Processo P01/02	
	<i>Core</i>	<i>Plate</i>	<i>Bushing</i>	<i>Frame</i>
Especificação máxima de Força de Campo Coercitivo (A/m)	100	80	100	60

Dentro da organização já foram realizados estudos acerca desta propriedade, baseados em lotes que despertaram o interesse devido à alta instabilidade que o processo revelava, uma vez que requeria forças de processo superiores ao esperado. Isto acontece devido ao facto de o processo de recozimento ter um perfil onde certas peças beneficiam de um arrefecimento mais lento do que outras, nos cestos próprios. Quanto maior o choque térmico maior são as forças coercitivas e as tensões internas, ficando as peças com uma pré tensão superior, que necessita de ser vencida no processo. Um destes estudos incidiu sobre a P06, onde o *Core* estava a sofrer deformações superiores ao expectável. Neste caso, foi concluído

que o processo de recozimento das *Plates* não estava conforme, uma vez que depois de corrigido, o processo estabilizou.

5.1.3 Qualidade dos acabamentos da superfície

Outra característica que merece atenção é relativa à qualidade da superfície das peças. Mesmo garantindo a conformidade nas anteriores propriedades, é necessário que as peças tenham bons acabamentos, de modo a evitar que se afete o processo. As superfícies mais críticas dos processos devem ser adequadas e sem material a mais ou a menos. Apontamentos como as rebarbas (rebordo exterior ou saliência extraordinária que se forma) e chanfros (rebordos ou cortes interiores realizados nas arestas de um material), geralmente presentes nos cantos e rebordos das peças, são importantes de controlar e comparar mediante os requisitos [98]

5.2 Recolha de dados e Metrologia

De forma a realizar análises estatísticas de qualidade, é imperativo recolher dados que sejam representativos e úteis. Não se deve correr o risco de obter conclusões enviesadas, das quais não se pode deduzir conclusões certas. De um modo geral o planeamento para a recolha de dados teve por base a sequência ilustrada na figura 5.5.

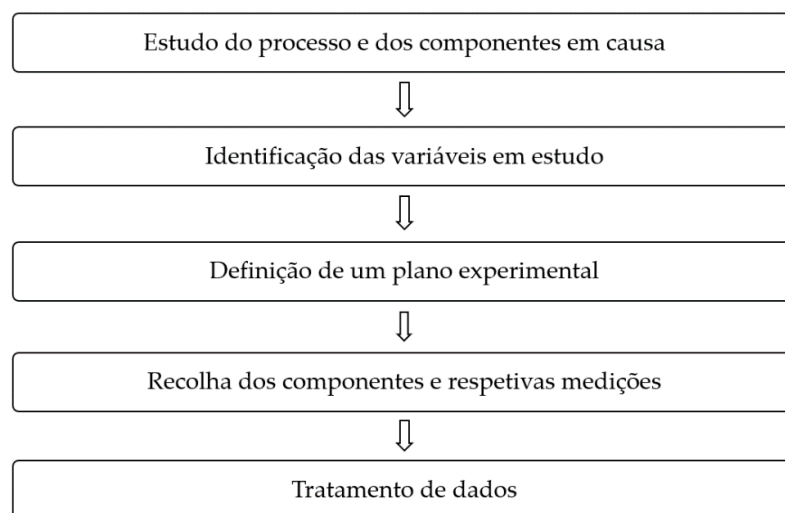


Figura 5.5 - Planeamento para a recolha de dados

As amostras seleccionadas durante este procedimento de recolha de dados devem incluir, sempre que possível, componentes que reflitam a população pretendida. Neste sentido, uma atenção especial é dada ao componente *Frame*, uma vez que no momento do presente estudo tem-se em *stock* 2 versões da mesma. De fornecedores diferentes, uma das versões

possui no furo principal de *press-fit* um chanfro (cota 3 da figura B.3, no Apêndice B) cobreado realizado pelo fornecedor, e a outra um chanfro que, por não ser contabilizado inicialmente, foi submetida a uma maquinação (retrabalho). Como o chanfro do furo tem um papel muito fundamental naquilo que é o *press-fit* das peças, ao facilitar o processo, são contabilizadas para o estudo componentes de ambas as versões.

5.3 Identificação das Variáveis em Estudo

Tendo o estudo do processo e dos componentes realizado, é possível agora concluir acerca das variáveis que se deve considerar para o estudo. O objetivo aqui passa por escolher apenas cotas geométricas das peças que possuam influência nos processos. Do conhecimento que existe dos mesmos, torna-se importante ter dimensionado nas amostras as zonas de superfície onde existe contacto das peças entre si ou mesmo das peças com o punção. Apesar de este ser o principal critério é possível elaborar na tabela 5.5 e na tabela 5.6 o raciocínio por detrás das cotas escolhidas, que podem ser analisadas no Apêndice B, nas figuras B.1 a B.4, com um esquema de *cores* que é detalhado de seguida. É de realçar que estes desenhos encontram-se bastante incompletos face ao original, devido a questões de confidencialidade. De notar ainda que as tolerâncias das cotas no desenho aplicam-se antes do revestimento. Ao longo do documento as tolerâncias usadas foram calculadas para incluir já o revestimento de superfície, uma vez que é essa a condição das peças.

Tabela 5.5 - Motivo de seleção das variáveis a estudar do Processo P06

Processo P06			
<i>Core</i>		<i>Plate</i>	
Cotas	Motivo	Cotas	Motivo
1	Afeta o momento em que o punção toca na peça	1, 3	Representa a superfície de interferência entre as peças
2, 3, 7, 10, 12,13,14	Representa a superfície de interferência entre as peças	5	Afeta a quantidade de força que é necessária fazer
4, 5, 6	Necessidade de uma superfície de contacto com o punção plana e conforme	2, 4	Afeta a planicidade do subconjunto e a existência de folga entre as peças
8, 9, 11	Representa a parte da peça que introduz estabilidade ao resultado do processo (<i>overlap</i> de material)	6	Presença de rebarbas poderia afetar a qualidade do <i>press-fit</i>

Tabela 5.6 - Motivo de seleção das variáveis a estudar do Processo P01/02

Processo P01/02			
<i>Bushing</i>		<i>Frame</i>	
Cotas	Motivo	Cotas	Motivo
1	Afeta o momento em que o punção toca na peça	1, 3, 7	Representa a superfície de interferência entre as peças
2, 3, 4, 6, 8, 9	Representa a superfície de interferência entre as peças	4	Afeta a quantidade de força que é necessária fazer
5, 12, 13	Necessidade de uma superfície de contacto com o punção plana e conforme	2, 5	Afeta a planicidade do subconjunto e a existência de folga entre as peças
7, 10, 11	Representa a parte da peça que introduz estabilidade ao resultado do processo (<i>overlap</i> de material)	6	Presença de rebarbas poderia afetar a qualidade do <i>press-fit</i>

Pretende-se assim averiguar, quantificar e avaliar a dimensão da significância destas cotas para com os processos. Os motivos listados nas tabelas 5.5 e 5.6 em tudo se relacionam, em última análise, com potenciais impactos que se possam verificar na funcionalidade do produto como um todo.

5.4 Definição e execução do plano experimental

Segundo a Norma ISO 7870-2:2013, [99], não podem ser estabelecidas regras gerais para a frequência e dimensão dos subgrupos. A frequência e dimensão dos subgrupos pode assim depender do custo da recolha e análise de amostras e considerações práticas aliadas

Com isto, ao analisar o contexto em mãos foi tido em conta as seguintes condicionantes:

- Os lotes dos 4 tipos de peças em questão apresentam dimensões que podem chegar aos vários milhares de unidades, o que significa que, mediante o planeamento da produção, a mudança de lotes pode ocorrer com frequências que chegam a uma ou mais semanas;
- A rapidez da indústria automóvel e em particular de contadores elétricos encontra-se em constantes otimizações, que acabam por afetar o produto. Deste modo, torna-se muitas vezes incomportável realizar estudos muito duradouros, uma vez que os sistemas envolvidos ou mesmo os produtos sofrem alterações que podem afetar o estudo;
- Os custos associados em componentes e custos associados à alocação de trabalho ao laboratório de metrologia.

O plano experimental é assim adaptado de acordo com as condicionantes. De forma a otimizar o estudo conclui-se que, de modo a ter uma amostra representativa, que comporte componentes de vários lotes, o plano passa por recolher um total de 150 unidades de cada componente, repartidos por 3 lotes diferentes (50 componentes de cada lote). No caso particular das *Frames*, um dos lotes utilizados corresponde a uma versão diferente (chanfro retrabalhado) dos outros dois lotes.

As amostras são assim recolhidas ao longo de várias semanas, sendo feito em paralelo o plano de medição com a equipa do laboratório que se encarrega desta tarefa. Ao serem realizadas num laboratório certificado, pode-se concluir que as medições são válidas. De notar que todas as medições são consideradas, mesmo no caso de a característica se encontrar fora de especificação, numa tentativa de incluir no estudo todo o tipo de peças que chega à linha de produção pronto para entrar nos processos, conferindo realismo ao modelo. Adicionalmente, é importante verificar que as dimensões presentes nas especificações dos dese-

nhos das peças são aplicáveis antes do revestimento de superfície, pelo que deve ser tido em atenção que as peças a recolher já possuem este revestimento e, por isso, diferentes cotas.

As cotas a medir correspondem às variáveis identificadas nas tabelas 5.5 e 5.6. No entanto, dadas as elevadas condicionantes a nível de tempo de medição, carga de trabalho e respetivos custos associados, é necessário optar por uma estratégia de medição alternativa, face à inicial, onde seriam medidas todas as cotas selecionadas a 100%.

Com base mais uma vez nas tabelas 5.5 e 5.6, é feita uma avaliação acerca das variáveis que se estima ter mais influência, com base em conhecimento de processo, o que permite a seguinte abordagem: as cotas mais sensíveis para o processo são medidas a 100%, sendo representadas nos desenhos das figuras B.1 a B.4 (Apêndice B), pela cor verde; as restantes cotas são medidas com base em amostras, sendo medidas 5 peças por cada lote de 50 nessas cotas, representadas pela cor vermelha. Deste modo, reduz-se em muito aquilo que são prazos, carga de trabalho e custos associados, e garante-se uma representatividade de lote de todas as cotas, passando estas cotas secundárias a ter uma análise mais qualitativa. Se existir alguma não conformidade com estas cotas medidas com base em amostras, é feita uma análise mais detalhada.

De modo a garantir a rastreabilidade dos dados, todas as amostras são numeradas, facilitando a análise estatística realizada.

5.5 Limitações e Pressupostos

O presente procedimento experimental é sujeito a algumas limitações e consequentes pressupostos, tais como:

- Definição do plano de amostras– Como já mencionado, existe a necessidade de otimizar o plano de amostras a nível de tempo e custos. É assim necessário alterar a estratégia de medição inicial, que passa por mais de 6 mil cotas, para uma mais otimizada, com cerca de 2 mil cotas.
- Tempo de execução da metrologia dos componentes – A situação pandémica que se impõe durante o decorrer deste projeto impacta em muito aquilo que é a capacidade de as equipas, neste caso, dos laboratórios, satisfazerem tais pedidos. É assim necessário recorrer a um laboratório externo numa outra empresa do grupo TE, na Índia.
- Metrologia dos componentes – Dada a complexidade dos cotas em estudo (com algumas cotas como os chanfros a necessitar de centenas de seções de medição), é necessário abdicar de algumas variáveis, tais como a nº 9 e 12 na peça *Core*, uma vez que exigiriam um equipamento especializado que não existe no laboratório.

- Revestimento de superfície – No sentido de averiguar se um revestimento com elevada dureza afeta a força necessária para os processos, é realizado um estudo acerca dos revestimentos das peças em questão. No entanto, dado a limitações técnicas a nível de especificações chave para a realização de testes de dureza, o estudo foi inconclusivo, para ambos os produtos que a presente dissertação utiliza como objeto. É possível analisar o estudo em questão no Apêndice A.
- Forças coercitivas – Apesar de todas as características, incluindo as forças coercitivas, possuírem de certa forma um controlo por parte dos fornecedores, torna-se numa análise que seria interessante de realizar em casos onde os processos em questão verifiquem forças de *press-fit* altas e conseqüentes deformações elevadas de materiais. Para este projeto, foi tido como pressuposto que esta característica está totalmente conforme.

DESCRIÇÃO DOS MODELOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo é feito todo o tratamento e análise dos dados obtidos. São aplicadas ferramentas estatísticas e de qualidade por forma a fazer uma análise de resultados. Os resultados e respetivos modelos obtidos para os processos são ainda validados num outro produto muito semelhante.

6.1 Análise de Dados

Para a análise e tratamento de dados realizada neste capítulo é utilizado o software Minitab®, na versão 21.1, um produto muito completo quanto a ferramentas de controlo de qualidade e estatística [79].

Na figura 6.1 é possível ver uma representação dos 150 componentes de cada tipo de peça (50 peças de cada lote para cada componente), que foram numerados previamente às medições.

As variáveis mais sensíveis para o processo, medidas a 100%, correspondem assim às características que vão estar em estudo. É de notar que, em relação às outras variáveis, medidas com base em amostras, não foi verificada nenhuma não conformidade que revela-se a necessidade de um estudo mais específico. Na tabela 6.1 é possível ver o nome de cada variável, por processo, com o respetivo número de cota associado no desenho.

De seguida, é feito um estudo acerca da distribuição e variabilidade entre lotes de todas estas variáveis, que pode ser analisado no Apêndice C, nas figuras C.1 a C.20. É possível verificar que cotas como o Diâmetro do furo da *Plate*, Altura *Bushing*, Diâmetro *Bushing* e Diâmetro Saliência *Bushing* apresentam lotes que apresentam clara variabilidade entre si. Adicionalmente, é possível identificar que cotas como a Altura Inserção *Core*, Diâmetro *Core* e Diâmetro *Frame* apresentam *outliers*, estando alguns fora de especificação.

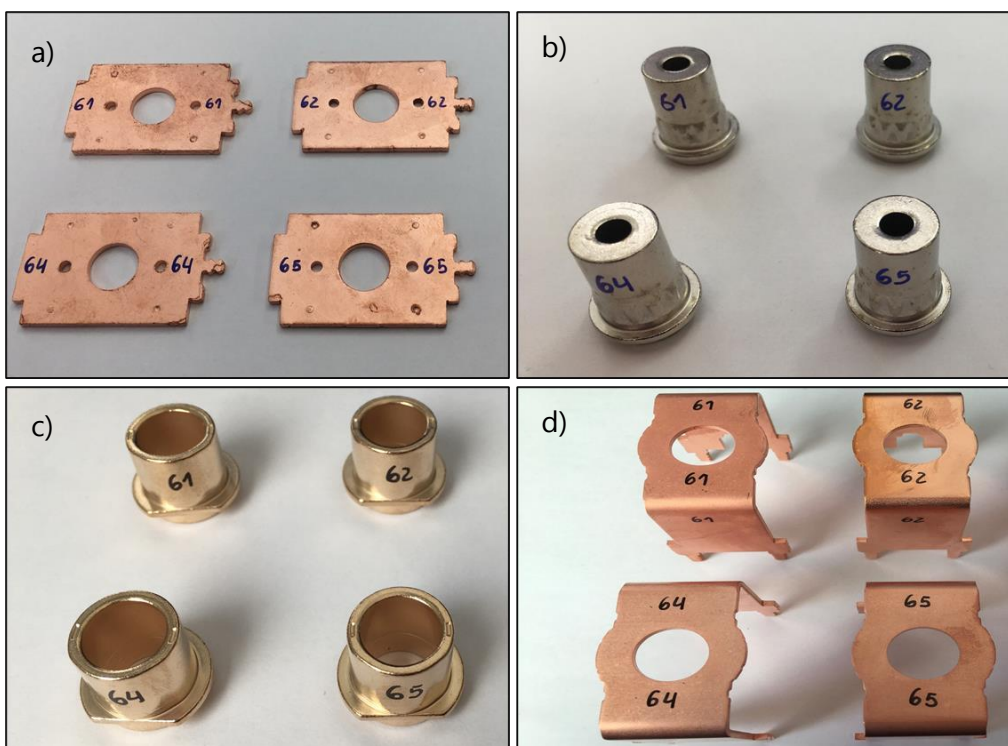


Figura 6.1 - Representação dos componentes utilizados, a) *Plate*, b) *Core*, c) *Bushing*, d) *Frame*

Tabela 6.1 - Nomenclatura das variáveis de entrada, por processo

	Processo P06	Processo P01/02
Variáveis (mm)	Diâmetro do furo da <i>Plate</i> (Cota 1)	Diâmetro <i>Frame</i> (Cota 1)
	Altura <i>Core</i> (Cota 1)	Altura <i>Bushing</i> (Cota 1)
	Altura Inserção <i>Core</i> (Cota 2)	Altura Inserção <i>Bushing</i> (Cota 2)
	Diâmetro <i>Core</i> (Cota 3)	Diâmetro <i>Bushing</i> (Cota 3)
	-	Diâmetro Saliência <i>Bushing</i> (Cota 4)

6.2 Análise dos Resultados

Executado todo o plano experimental e tendo todos os dados recolhidos e tratados, procedeu-se à análise dos mesmos.

6.2.1 Análise de Variância

Inicialmente são realizadas análises de regressão e de variância, com o objetivo principal de averiguar se as variáveis selecionadas constituem características significativas para os processos, analisando a influência da variabilidade de *inputs* nos *outputs*. Deste modo, é possível utilizar os dados e os componentes presentes para retirar, de uma forma eficiente, barata e rápida, informação sobre os processos, o que é bastante útil na preparação de um DOE. Para isso são realizadas 25 montagens aleatórias de cada processo, e executados os respetivos controlos. Este número de montagens, que surge após uma consideração cuidada do custo associado não só ao material utilizado, como ao tempo perdido de produção para realizar todas estas montagens.

Para esta análise as respostas selecionadas encontram-se na tabela 6.2. As variáveis selecionadas correspondem às identificadas como sensíveis para o processo (tabela 6.1 atrás). Quanto às respostas, apesar de todos os controlos requeridos terem sido executados e avaliados, foram selecionadas para estudo as respostas associadas a controlos que produzem variáveis contínuas, de modo a proceder às análises desejadas.

Tabela 6.2 - Respostas selecionadas para a Análise de Regressão e Variância

	Processo P06	Processo P01/02
Respostas	Força de Retenção (N)	Força de Retenção (N)
	Planicidade da <i>Plate</i> (mm)	Valor na Linha de Controlo X (kN)
	Valor na Linha de Controlo X (kN)	Valor na Linha de Controlo Y (mm)

Em modo de exemplo a resposta de nome Valor na Linha de Controlo X (kN) do processo P06 consiste no valor, em força, que a curva da montagem em questão assume, quando passa pela Linha de Controlo X, definida na tabela 4.1.

De notar que são executados todos os controlos de processo requeridos, tal como exposto no 4.7.2. Verifica-se nos controlos correspondentes às respostas não selecionadas que: no processo P06, tudo está conforme o requisito, à exceção de 3 montagens cuja Planicidade da *Plate* não está de acordo com o requisito; no processo P01/02, tudo conforme o requisito, à exceção de 3 montagens que chumbaram no controlo da folga, e por essa razão tiveram uma Força de Retenção relativamente pequena também (mas dentro da janela requisitada). Contudo, examinando as peças em si e as suas cotas, não é possível evidenciar nenhuma causalidade especial, pelo que se prossegue com o estudo. Nas figuras 6.2 e 6.3 é possível observar o resultado final de ambos os processos.

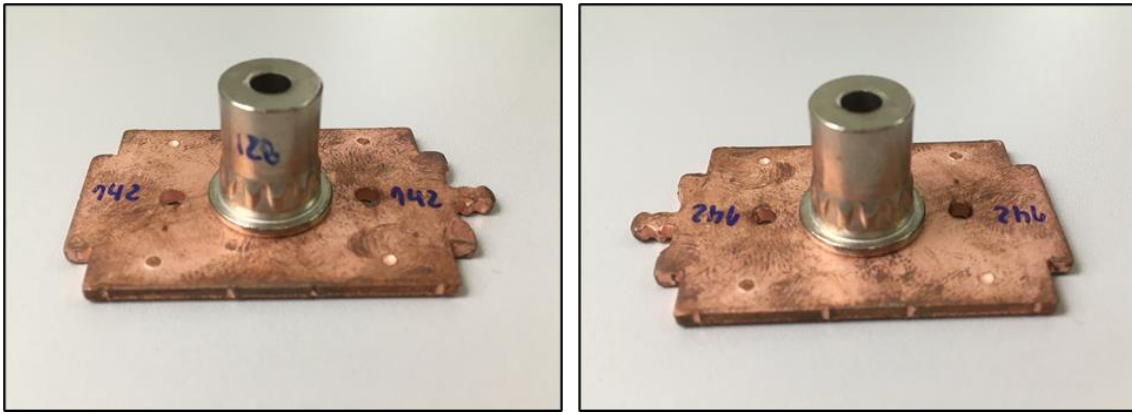


Figura 6.2 - Ilustração do resultado final do Processo P06, em duas vistas

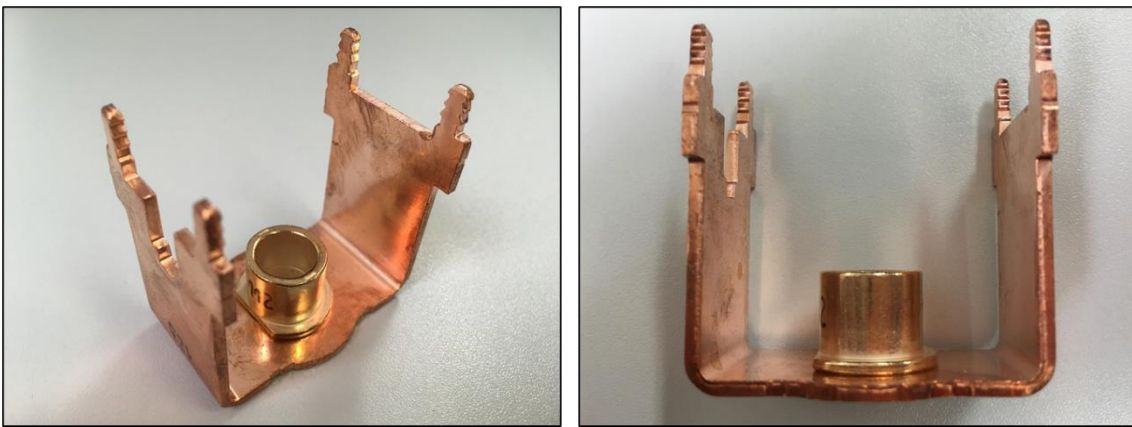


Figura 6.3 - Ilustração do resultado final do processo P01/02, em duas vistas

Sendo assim, obtém-se, para cada uma das respostas presentes na tabela 6.2, uma ANOVA. É de realçar que nesta análise os termos presentes no modelo possuem interações até à ordem 2. Adicionalmente, o método de regressão utilizado é o *Stepwise*, um método muito utilizado para modelos de regressão aplicados em variadas temáticas de estudo [79], [100], [101]. Quanto ao nível de significância definido tanto para entrada como para saída do modelo, este é definido com o valor 0,10. Isto, porque um valor muito pequeno pode revelar-se demasiado restritivo, correndo-se o risco de não identificar efeitos importantes (Erro Tipo II), ao ponto que o Erro de Tipo I, não revela um risco tão grande, tendo em conta o objetivo em causa de fazer uma análise prévia de identificação de variáveis significativas. Apesar de os valores sugeridos em [79] passarem por um nível de significância de entrada de 0,25 e um nível de significância de saída de 0,10, o *software* Minitab força a entrada de valores iguais para ambos.

Para cada ANOVA, é também apresentada a respetiva verificação de pressupostos, através de uma análise de resíduos.

6.2.1.1 Análise da Resposta Força de Retenção (P06)

Como é possível observar na tabela 6.3, para a resposta de Força de Retenção, as variáveis significativas são o Diâmetro da *Plate* e o Diâmetro do *Core*.

Tabela 6.3 - ANOVA condensada para a Força de Retenção (Processo P06)

Fonte	SS (Aj.)	g.l.	MS (Aj.)	F_0	Valor-p
Regressão	541644	2	270822	7,93	0,003
Diâmetro do furo da <i>Plate</i>	270882	1	270882	7,93	0,010
Diâmetro <i>Core</i>	160537	1	160537	4,70	0,041
Erro	751286	22	34149		
Total	1292930	24			

De seguida, a figura 6.4 e 6.5 apresenta a respetiva verificação de pressupostos, através de uma análise de resíduos.

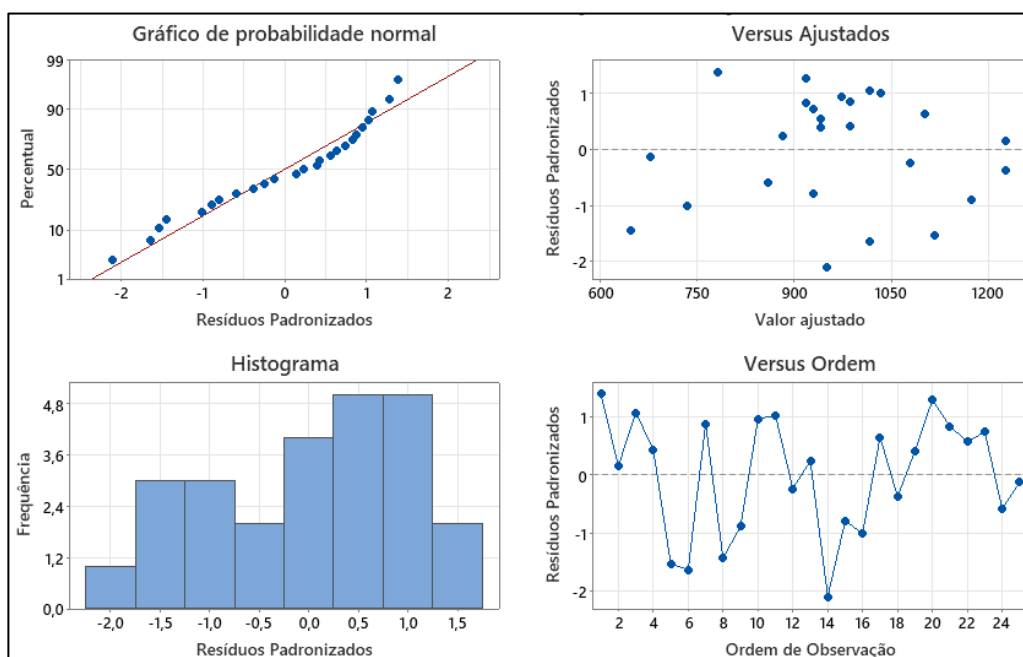


Figura 6.4 - Gráficos de Resíduos para a Força de Retenção (Processo P06)

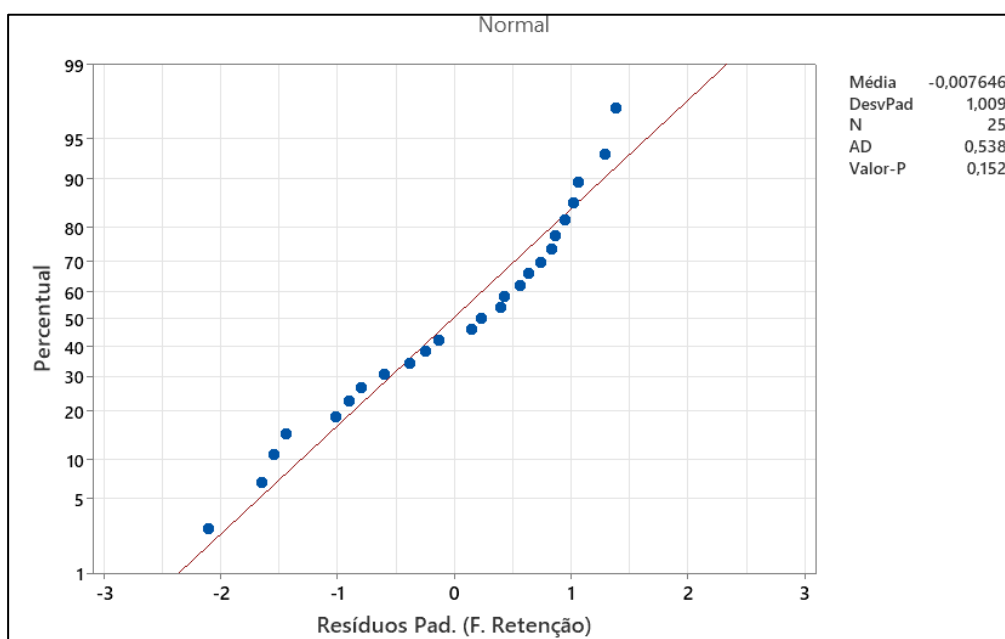


Figura 6.5 - Verificação de Normalidade (Força de Retenção - P06)

Como se pode analisar, através de um gráfico de probabilidades da distribuição normal em função dos resíduos (figura 6.5), usando o Teste de Normalidade *Anderson-Darling*, conclui-se que o pressuposto de normalidade é cumprido, uma vez que o valor-p é maior ou igual a 0,05. O teste de *Anderson-Darling* usado é considerado uma das ferramentas estatísticas mais poderosas para detetar não conformidades em relação à normalidade dos dados [102].

Para além disso, como se pode observar na figura 6.4, através de um gráfico dos resíduos padronizados em função dos valores previstos para os mesmos (valor ajustado), o pressuposto da homogeneidade é cumprido, uma vez que o resultado não apresenta nenhuma estrutura especial. Por fim, averiguando o pressuposto da independência dos resíduos, é utilizado um gráfico dos resíduos padronizados em função do tempo, ou seja, em função da ordem de observação (figura 6.4). Assim, é possível concluir que o pressuposto é cumprido, uma vez que o resultado não evidencia nenhuma tendência especial e, por isso, afirma-se que não existe correlação entre os resíduos e que os mesmos são independentes. A mesma análise detalhada é realizada nas seguintes Análises de Resíduos.

Conclui-se assim que o Diâmetro do furo da *Plate* e o Diâmetro *Core* são variáveis significativas para esta resposta.

6.2.1.2 Análise da Resposta Planicidade da *Plate* (P06)

Como é possível observar na tabela 6.4, para a resposta de Planicidade da *Plate*, conclui-se que o Diâmetro da *Plate* é uma variável significativa.

Tabela 6.4 - ANOVA condensada para a Planicidade da *Plate* (Processo P06)

Fonte	SS (Aj.)	g.l.	MS (Aj.)	F_0	Valor-p
Regressão	0,003715	1	0,003715	3,03	0,095
Diâmetro do furo da <i>Plate</i>	0,003715	1	0,003715	3,03	0,095
Erro	0,028229	23	0,001227		
Total	0,031944	24			

De seguida, a figura 6.6 e 6.7 apresenta a respetiva verificação de pressupostos, através de uma análise de resíduos.

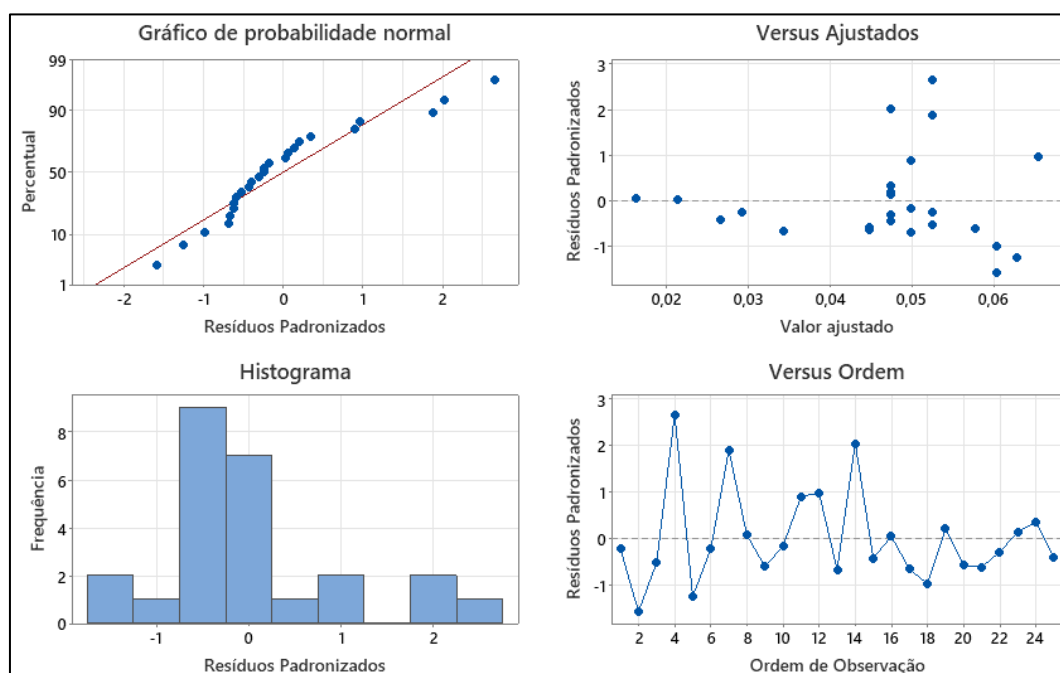


Figura 6.6 - Gráficos de Resíduos para a Planicidade da *Plate* (Processo P06)

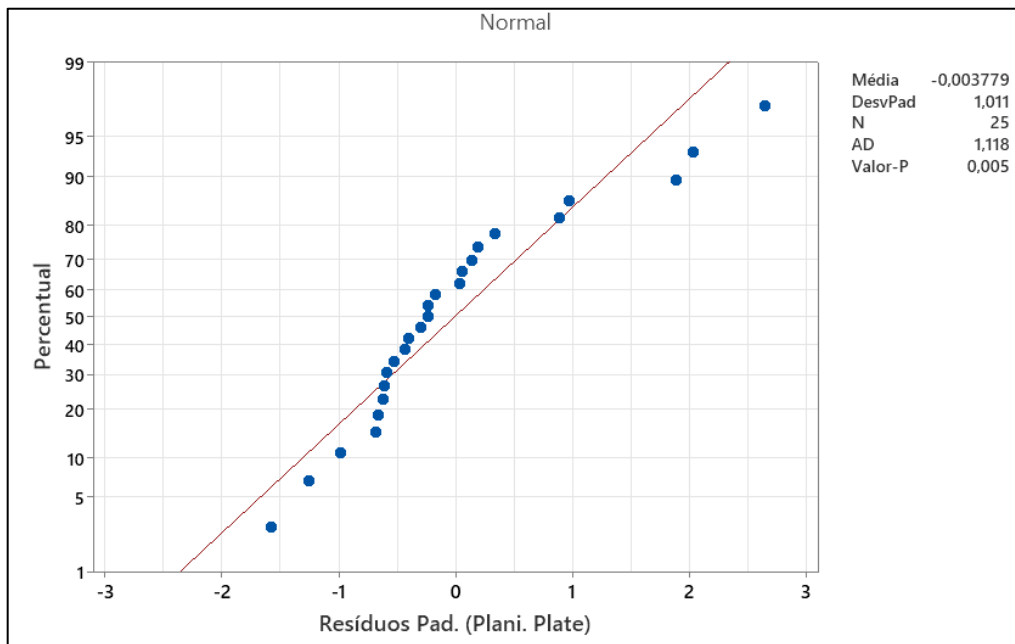


Figura 6.7 - Verificação de Normalidade (Planicidade da *Plate* - P06)

Como se pode analisar através da figura 6.7, conclui-se que o pressuposto de normalidade não é cumprido, uma vez que o valor-p é menor que 0,05. Procede-se então a uma Transformação Box-Cox dos dados da resposta em questão, uma vez que estes não são normalmente distribuídos. A variável da resposta, ao possuir uma variabilidade não constante constitui um desvio àquilo que são os pressupostos desta análise de variância, pelo que é necessário realizar a transformação (figura 6.8), de modo a estabilizar a variabilidade desta mesma resposta [79].

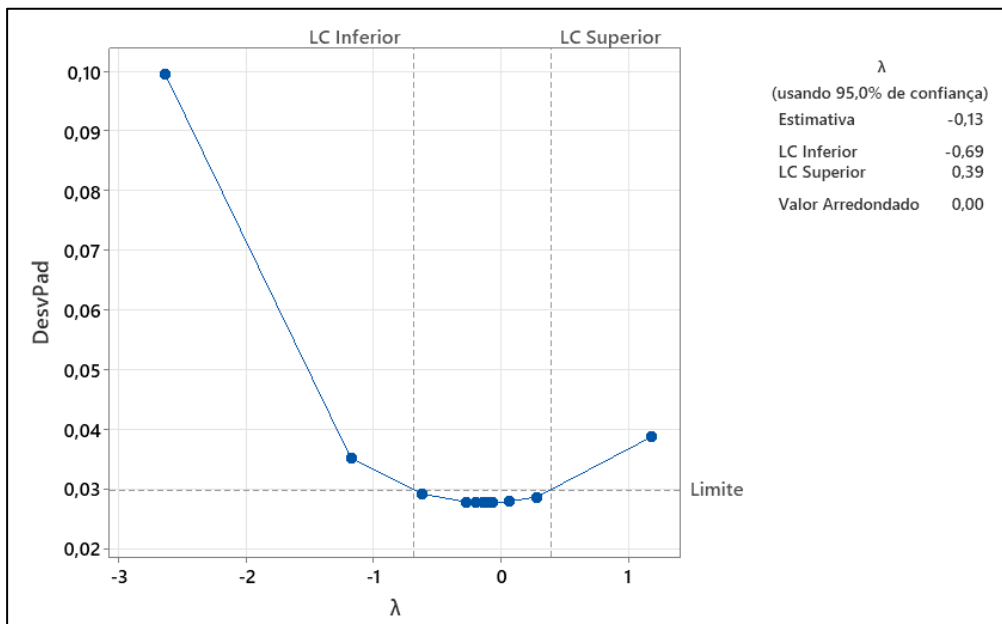


Figura 6.8 - Gráfico de Box-Cox da resposta Planicidade da *Plate* (P06)

Transformados os dados segundo a estimativa obtida, é realizada a segunda iteração da análise, agora usando a resposta com os dados transformados. Conclui-se assim que todas as variáveis presentes na tabela 6.5 constituem variáveis significativas para a resposta em questão.

Tabela 6.5 - ANOVA condensada para a Planicidade da *Plate*, Resposta Transformada (Processo P06)

Fonte	SS (Aj.)	g.l.	MS (Aj.)	F_0	Valor-p
Regressão	6,775	4	1,6937	5,18	0,005
Diâmetro do furo da <i>Plate</i>	3,145	1	3,1450	9,62	0,006
Altura <i>Core</i>	1,086	1	1,0859	3,32	0,083
Diâmetro <i>Core</i>	1,088	1	1,0878	3,33	0,083
Altura <i>Core</i> * Diâmetro <i>Core</i>	1,084	1	1,0844	3,32	0,084
Erro	6,537	20	0,3269		
Total	13,312	24			

De seguida, a figura 6.9 e 6.10 apresenta a respetiva verificação de pressupostos, através de uma análise de resíduos.

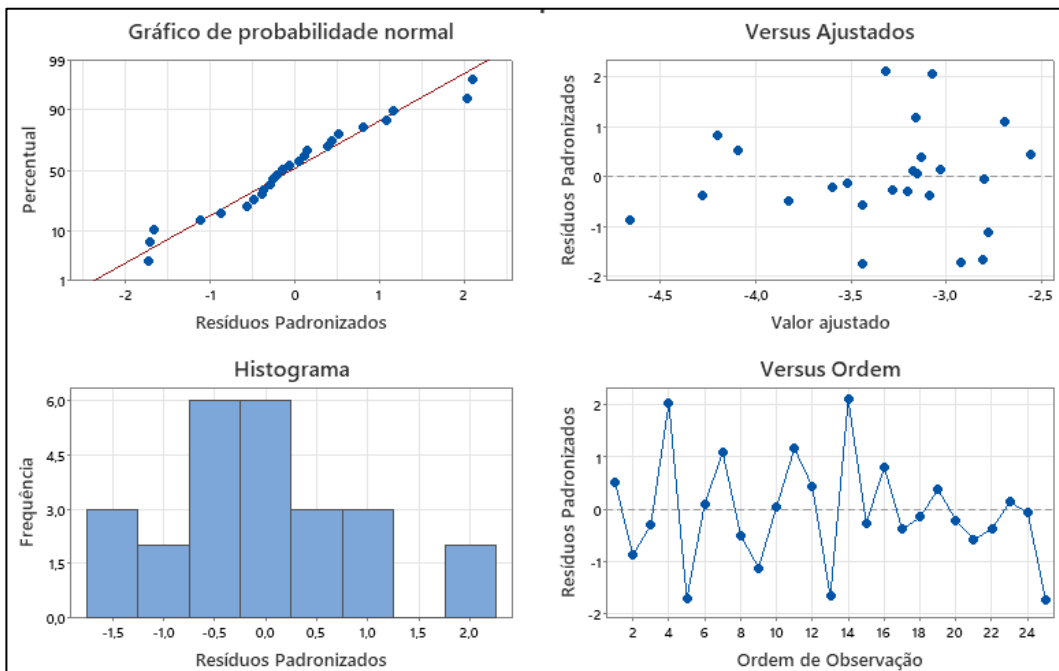


Figura 6.9 - Gráficos de Resíduos para a Planicidade da *Plate*, Resposta Transformada (Processo P06)

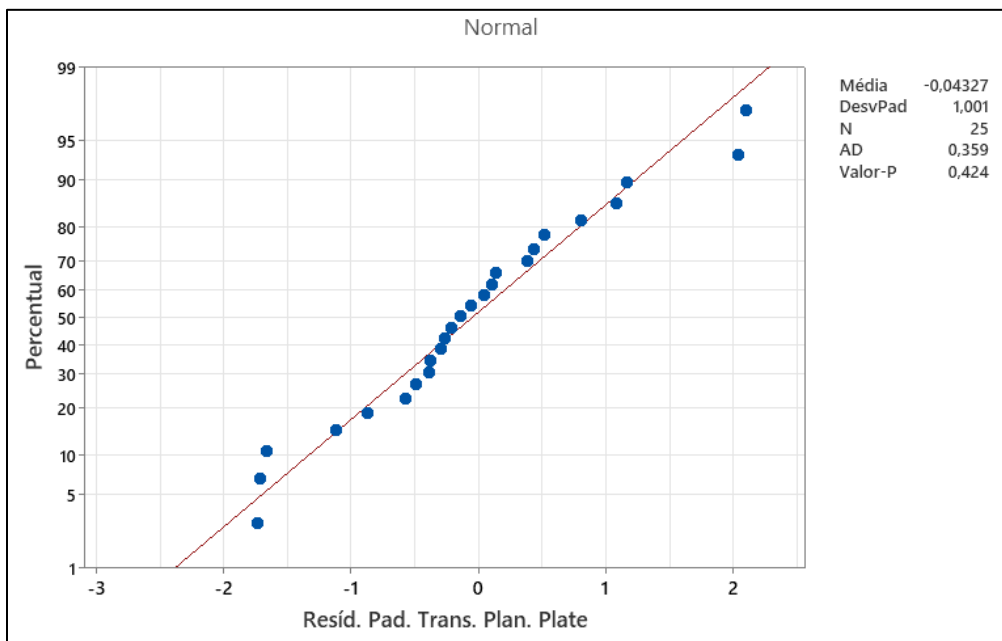


Figura 6.10 - Verificação de Normalidade (Planicidade da *Plate*, Resposta Transformada - P06)

Como se pode analisar na figura 6.10, o pressuposto de normalidade é agora cumprido, uma vez que o valor-p é maior ou igual a 0,05.

Adicionalmente, como se pode observar na figura 6.9, o pressuposto da homogeneidade é cumprido, uma vez que o resultado não apresenta nenhuma estrutura especial. Averi-

quando o pressuposto da independência dos resíduos, é possível concluir que o pressuposto é cumprido, uma vez que o resultado não evidencia nenhuma tendência especial.

Conclui-se assim que o Diâmetro do furo da *Plate*, o Diâmetro *Core*, a Altura *Core* e interação Altura *Core**Diâmetro *Core*, são variáveis significativas para esta resposta.

6.2.1.3 Análise da Resposta Valor na Linha de Controlo X (P06)

Para a resposta de Valor na Linha de Controlo X, conclui-se que não há variáveis significativas, uma vez que, no processo de atingir a ANOVA condensada, ao utilizar o método de regressão de *Stepwise*, todas as variáveis possuíam um valor-p superior a 0,10, pelo que foram forçadas a sair do modelo e assim, não existindo qualquer termo a ser incluído no modelo desta resposta em particular.

6.2.1.4 Análise da Resposta Força de Retenção (P01/02)

Como é possível observar na tabela 6.6, para a resposta de Força de Retenção, conclui-se que o Diâmetro da *Frame* e o Diâmetro do *Bushing* são variáveis significativas.

Tabela 6.6 - ANOVA condensada para a Força de Retenção (Processo P01/02)

Fonte	SS (Aj.)	g.l.	MS (Aj.)	F_0	Valor-p
Regressão	440912	2	220456	10,57	0,001
Diâmetro <i>Frame</i>	103779	1	103779	4,97	0,036
Diâmetro <i>Bushing</i>	436449	1	436449	20,92	0,000
Erro	459018	22	20864		
Total	899930	24			

De seguida, a figura 6.11 e 6.12 apresenta a respetiva verificação de pressupostos, através de uma análise de resíduos.

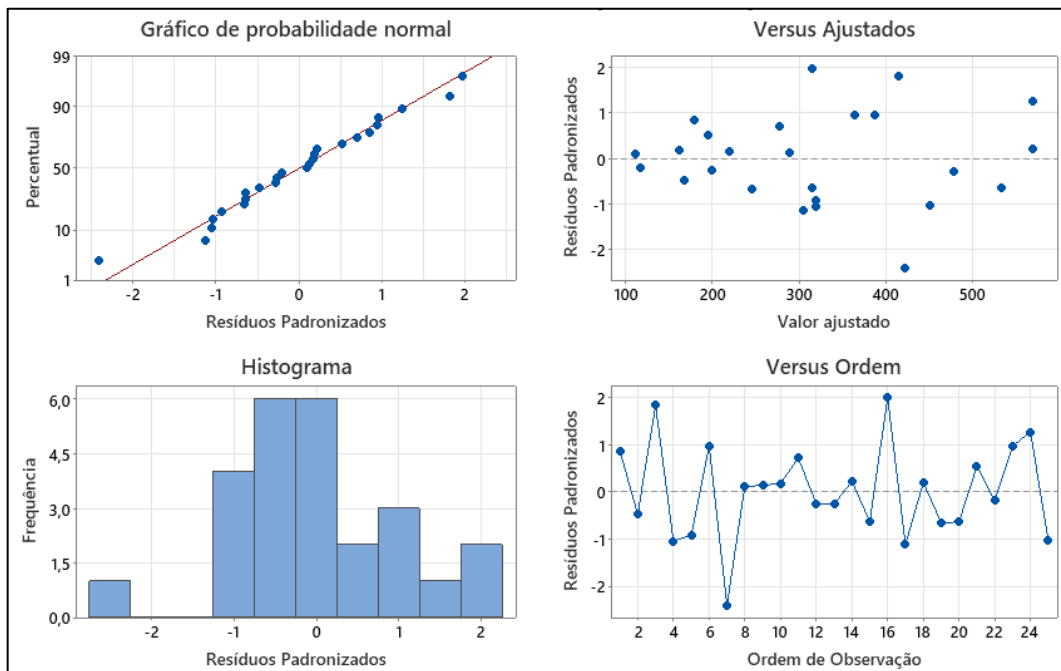


Figura 6.11 - Gráficos de Resíduos para a Força de Retenção (Processo P01/02)

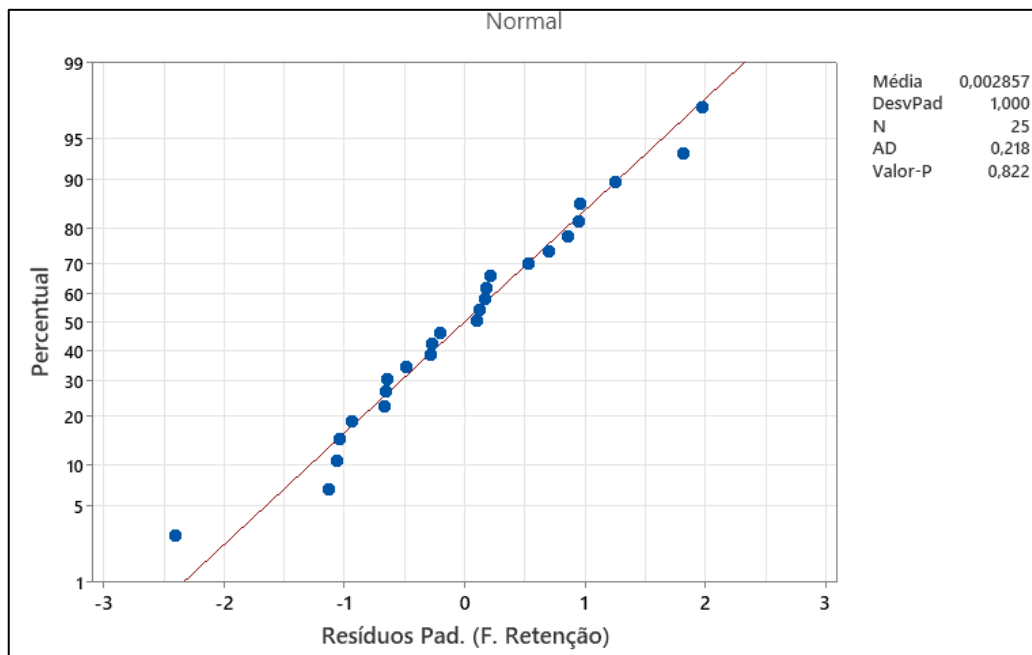


Figura 6.12 - Verificação de Normalidade (Força Retenção - P01/02)

Como se pode analisar na figura 6.12, o pressuposto de normalidade é cumprido, uma vez que o valor-p é maior ou igual a 0,05.

Adicionalmente, como se pode observar na figura 6.11, o pressuposto da homogeneidade é cumprido, uma vez que o gráfico não apresenta nenhuma estrutura especial. É possí-

vel também concluir que o pressuposto da independência dos resíduos é cumprido uma vez que o resultado do gráfico não evidencia nenhuma tendência especial.

Conclui-se assim que o Diâmetro *Frame* e o Diâmetro *Bushing* são variáveis significativas para esta resposta.

6.2.1.5 Análise da Resposta Valor na Linha de Controlo Y (P01/02)

Para a resposta de Valor na Linha de Controlo Y, conclui-se que não há variáveis significativas, uma vez que, no processo de atingir a ANOVA condensada, ao utilizar o método de regressão de *Stepwise*, todas as variáveis possuíam um valor-p superior a 0,10, pelo que foram forçadas a sair do modelo e assim, não existindo qualquer termo a ser incluído no modelo desta resposta em particular.

6.2.1.6 Análise da Resposta Valor na Linha de Controlo X (P01/02)

Como é possível observar na tabela 6.7, para a resposta de Valor na Linha de Controlo X, conclui-se que o Diâmetro do *Bushing* é uma variável significativa.

Tabela 6.7 - ANOVA condensada para o Valor de Controlo na Linha X (Processo P01/02)

Fonte	SS (Aj.)	g.l.	MS (Aj.)	F_0	Valor-p
Regressão	1,411	1	1,4114	4,60	0,043
Diâmetro <i>Bushing</i>	1,411	1	1,4114	4,60	0,043
Erro	7,057	23	0,3068		
Total	8,469	24			

De seguida, a figura 6.13 e 6.14 apresenta a respetiva verificação de pressupostos, através de uma análise de resíduos.

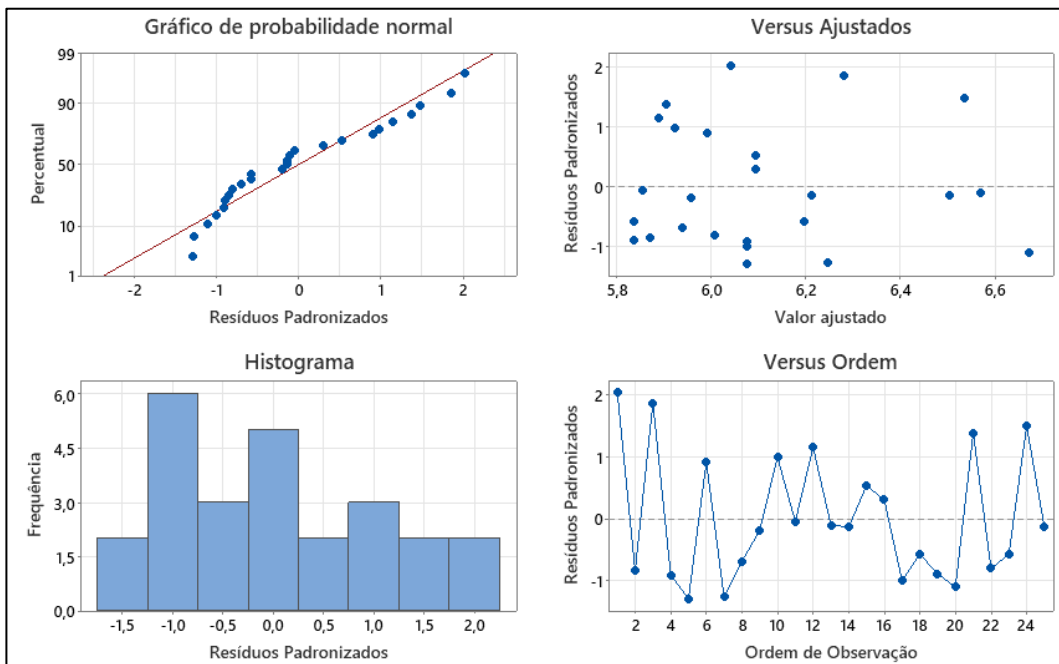


Figura 6.13 - Gráficos de Resíduos para o Valor na Linha de Controle X (Processo P01/02)

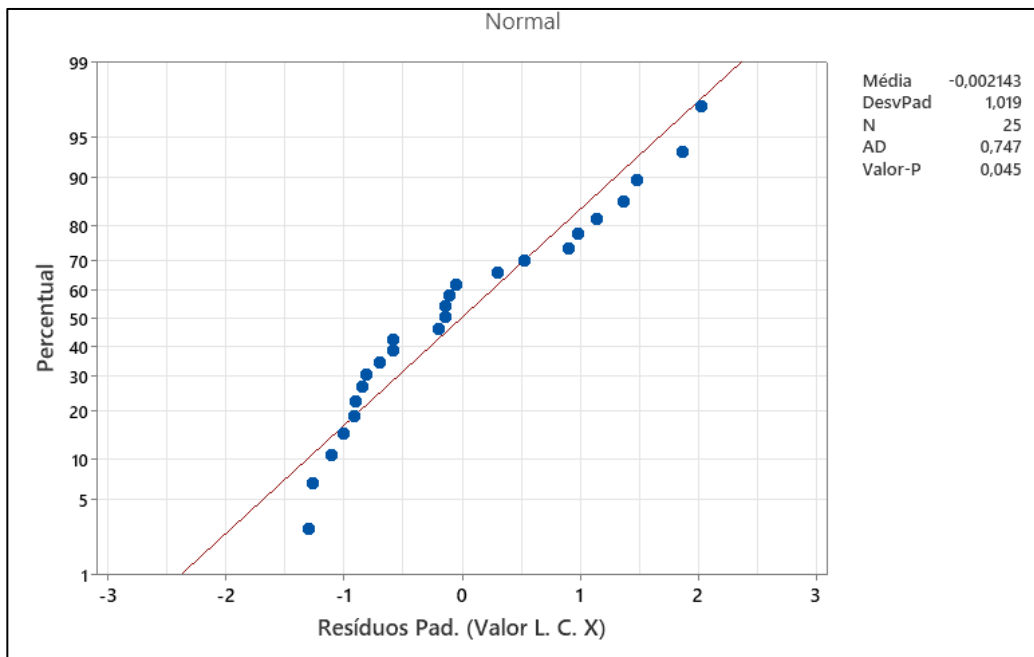


Figura 6.14 - Verificação de Normalidade (Valor na Linha de Controle X - P01/02)

Como se pode analisar na figura 6.14, conclui-se que o pressuposto de normalidade da ANOVA não é cumprido, uma vez que o valor-p é menor que 0,05. Procede-se então a uma Transformação Box-Cox dos dados da resposta em questão, pelos motivos já mencionados (figura 6.15).

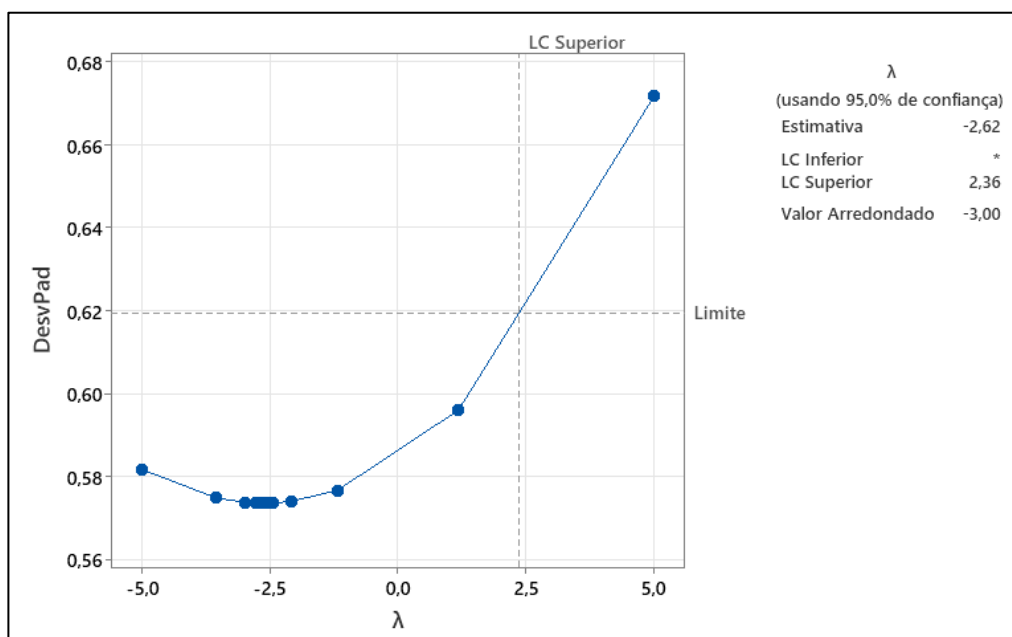


Figura 6.15 - Gráfico de Box-Cox da resposta Valor na Linha de Controle X (P01/02)

Transformados os dados segundo a estimativa obtida, é realizada a segunda iteração da análise, agora usando a resposta com os dados transformados.

Conclui-se assim que o Diâmetro do *Bushing* constitui uma variável significativa para a resposta em questão, como se pode observar pela tabela 6.8.

Tabela 6.8 - ANOVA condensada para a Valor na Linha de Controle X, Resposta Transformada (Processo P01/02)

Fonte	SS (Aj.)	g.l.	MS (Aj.)	F_0	Valor-p
Regressão	0,000006	1	0,000006	4,83	0,038
Diâmetro <i>Bushing</i>	0,000006	1	0,000006	4,83	0,038
Erro	0,000031	23	0,000001		
Total	0,000037	24			

De seguida, a figura 6.16 e 6.17 apresenta a respetiva verificação de pressupostos, através de uma análise de resíduos.

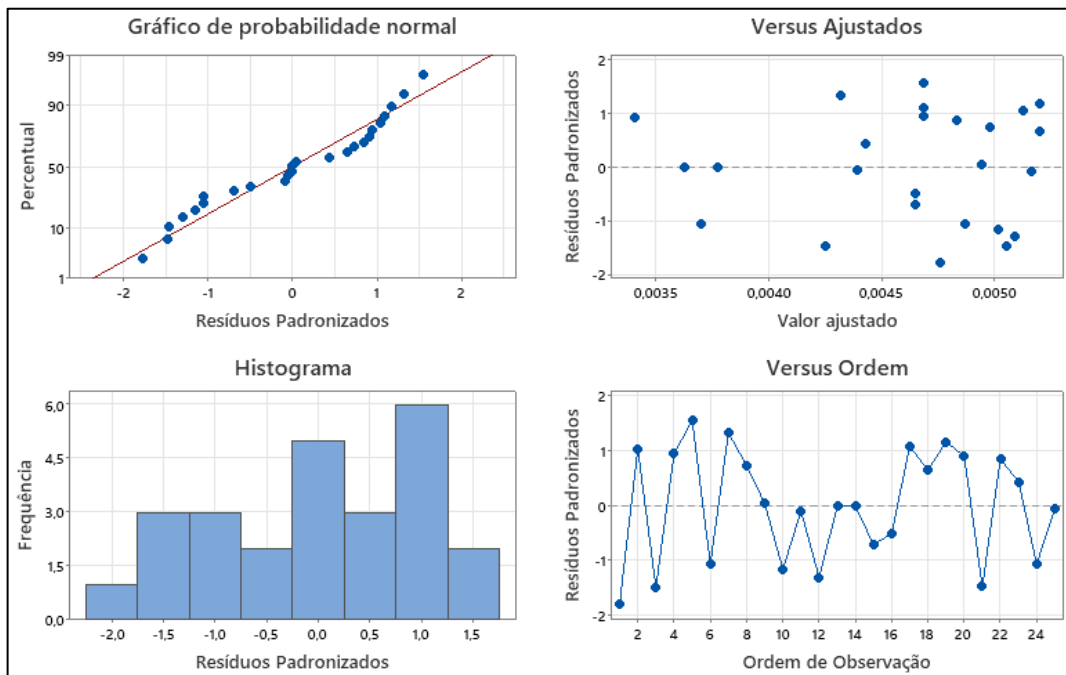


Figura 6.16 - Gráficos de Resíduos para o Valor na Linha Controlo X, Resposta Transformada (Processo P01/02)

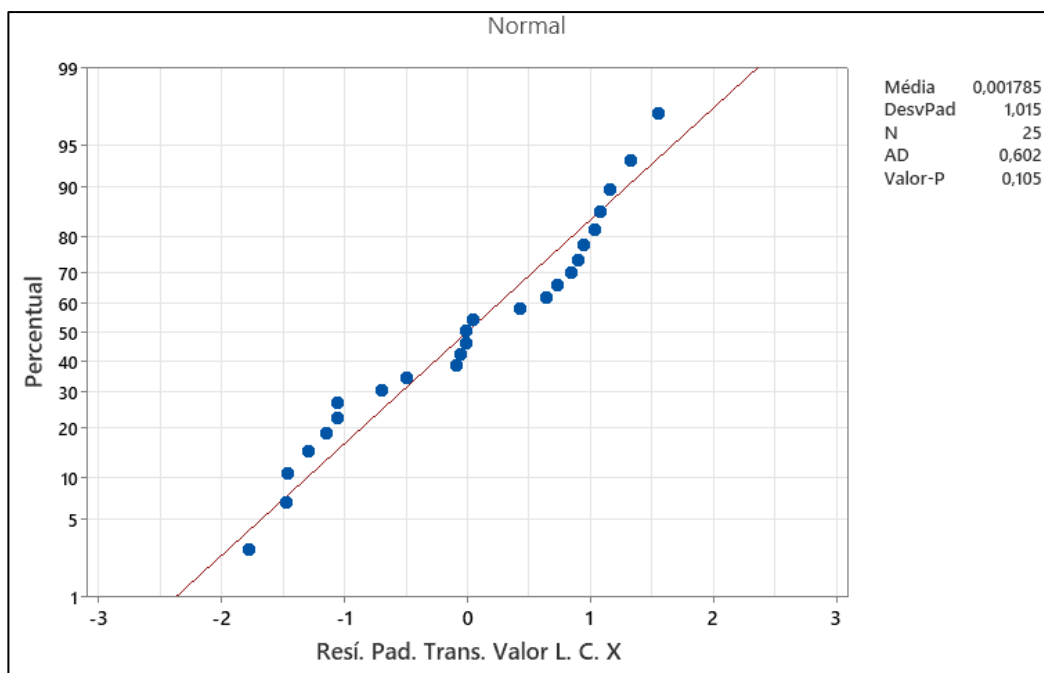


Figura 6.17 - Verificação de Normalidade (Valor na Linha de Controlo X, Resposta Transformada - P01/02)

Como se pode analisar, o pressuposto de normalidade é agora cumprido, uma vez que o valor-p é maior ou igual a 0,05 (figura 6.17).

Adicionalmente, como se pode observar na figura 6.16, o pressuposto da homogeneidade é cumprido, uma vez que o resultado não apresenta nenhuma estrutura especial. Averiguando o pressuposto da independência dos resíduos, é possível concluir que o pressuposto é cumprido, uma vez que o resultado não evidencia nenhuma tendência especial.

Assim, após todo este estudo e análise é possível executar um Desenho de Experiências de uma forma mais eficaz, na medida em que o conhecimento que se recolheu acerca do processo permite otimizar o seu planeamento e conseqüentemente a sua execução.

6.2.2 Desenho de Experiências

A utilização de DOE como metodologia para atingir a modelação preditiva, apesar de ainda necessitar de mais estudos, tem vindo a mostrar valor na comunidade científica [89].

Neste estudo em particular, DOE permitirá não só modelar o processo, como também concluir acerca das variáveis significativas e das influências que as mesmas possuem, forçando agora a entrada de mais informação do processo (maior variabilidade de tolerâncias), na medida em que os componentes usados são de acordo com o planeamento de experiências, e não aleatórios, como é feito na análise de regressão e de variância anterior.

Primeiramente, é necessário definir os fatores do DOE. Com base no estudo realizado acerca das variáveis significativas, é possível unir esses resultados com o conhecimento que se possui do processo para tomar uma decisão. A nível das ANOVA executadas, é possível ver que existe uma clara convergência das variáveis significativas para cotas que definem a zona de interferência das peças, como os diâmetros de inserção do *Core* e do *Bushing*, e como os diâmetros dos furos da *Plate* e da *Frame*, uma vez que foram as variáveis mais significativas nos resultados das ANOVA para as várias respostas. Para além destas, foi identificado também como variável significativa para a resposta Planicidade da *Plate* a cota de Altura do *Core*, bem como a interação entre a mesma e o Diâmetro do *Core*. No entanto, os fatores definidos para o DOE são:

- Para o processo P06, o Diâmetro da *Plate* e o Diâmetro do *Core*
- Para o processo P01/02, o Diâmetro da *Frame* e o Diâmetro do *Bushing*

A exclusão da variável Altura *Core* passa pelas seguintes razões:

- Conhecimento que já existe sobre o processo. É possível concluir que esta cota não é tão crítica como as restantes, na medida em que as prensas utilizadas podem ser definidas com perfis de montagem por força, o que elimina muito daquilo que é o impacto desta altura, tornando o processo independente da mesma. Para além disso, existe também a possibilidade de utilizar prensas que possuem uma compensação

dinâmica de tolerâncias da altura dos componentes, o que pode ser utilizado para mitigar ou eliminar o impacto desta variável;

- Representa a variável significativa do anterior estudo que obteve os valor-p superiores;
- Fator tempo e o fator económico. Um DOE mais otimizado permite um tempo e custo associado à de realização de experiências e de possível maquinaria de componentes bastante menor.

Sendo assim, dado o número de fatores que existe para cada processo, e o facto de ser expectável uma relação linear entre os fatores e a resposta, o Desenho Fatorial Completo apresenta-se como uma boa opção de estudo. Quanto aos níveis a utilizar, pelo mesmo facto, não é esperado a necessidade de usar mais do que dois. Para além disso, a utilização de apenas 2 níveis otimiza aquilo que é a definição das peças a usar para o estudo [79]. Sendo assim, é possível concluir que o planeamento adequado a utilizar consiste num Desenho Fatorial Completo a 2 níveis.

Apesar disso, uma adição que é feita à matriz de planeamento deste *design* consiste nos valores centrais. São adicionados 5 pontos centrais por processo, o que permite investigar e detetar uma potencial curvatura e testar se os termos quadráticos puros são necessários, aumentando a robustez do *design* do DOE. Estes pontos centrais possuem valores associados ao nível intermédio dos níveis usados, onde o nível baixo (-1) procura a melhor aproximação possível à tolerância mínima da cota, e o nível alto (+1), procura a melhor aproximação possível à tolerância máxima da cota. É possível verificar que é usualmente recomendado a utilização de 4 a 5 pontos centrais, quando possível [79], [86].

Tendo isto definido, é necessário definir o número de réplicas. Tanto os valores centrais como as réplicas são ferramentas que aumentam a probabilidade de evidenciar diferenças estatisticamente significativas [79], [86]. Para estipular o número de réplicas a usar é preciso ter em conta os componentes disponíveis, na medida em que quanto maior for o número de réplicas mais difícil se torna respeitar os valores atribuídos aos níveis, dado a escassez de algumas peças em termos de cotas nas tolerâncias máximas e mínimas. Considera-se ter componentes suficientes para utilizar 5 réplicas.

Para além disso, é possível utilizar a ferramenta de teste de Poder e Tamanho de Amostra (para Desenho Fatorial Completo de 2 níveis) do Minitab para ajudar a averiguar. Idealmente, esta ferramenta seria utilizada para todas as respostas. No entanto, a resposta de Valor na Linha de Controlo X, na medida em que se trata do principal controlo do processo, proporciona uma mais correta e sensível determinação do efeito que se pretende detetar na sua resposta, pelo que esta análise se cinge à mesma.

Com base no conhecimento de processo, pretende-se que o DOE seja capaz de detetar com bom poder um efeito de 1kN, para ambos os processos. Considera-se assim para os testes o definido na tabela 6.9, sendo a última linha o resultado dos testes.

Tabela 6.9 - Testes de Poder e Tamanho de Amostra para definição de nº de réplicas

	Processo P06	Processo P01-02
Nível de Significância	0,05	
Desvio Padrão da Resposta com base no histórico das ANOVA	0,3778	0,594
Nº Fatores	2	2
Nº Pontos de extremidade	4	4
Réplicas	5	5
Efeito	1	1
Nº Pontos Centrais por Bloco	5	5
Poder	0,999872	0,9472

Deste modo, existe uma probabilidade de 99,99% para o processo P06 e uma probabilidade de 94,72% para o processo P01/02 do teste, no DOE, rejeitar corretamente a Hipótese Nula, o que se considera satisfatório, pelo que se confirma a intenção de realizar 5 réplicas. É possível ainda realizar uma análise às curvas de poder desde estudo, que permitem averiguar o compromisso que é feito entre o poder e a magnitude do efeito que se deseja detetar (figuras 6.18 e 6.19).

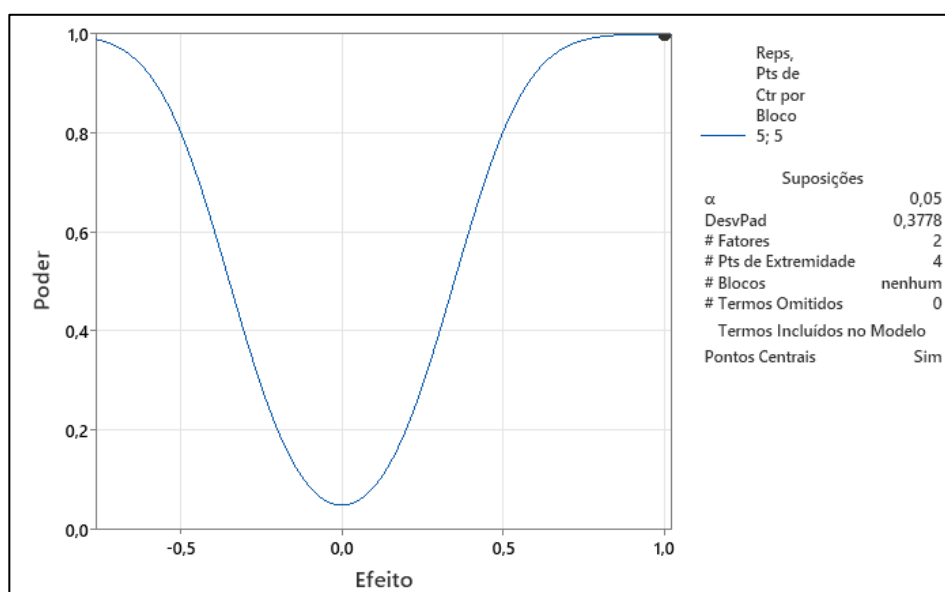


Figura 6.18 - Curva de Poder para a presente definição do DOE do Processo P06

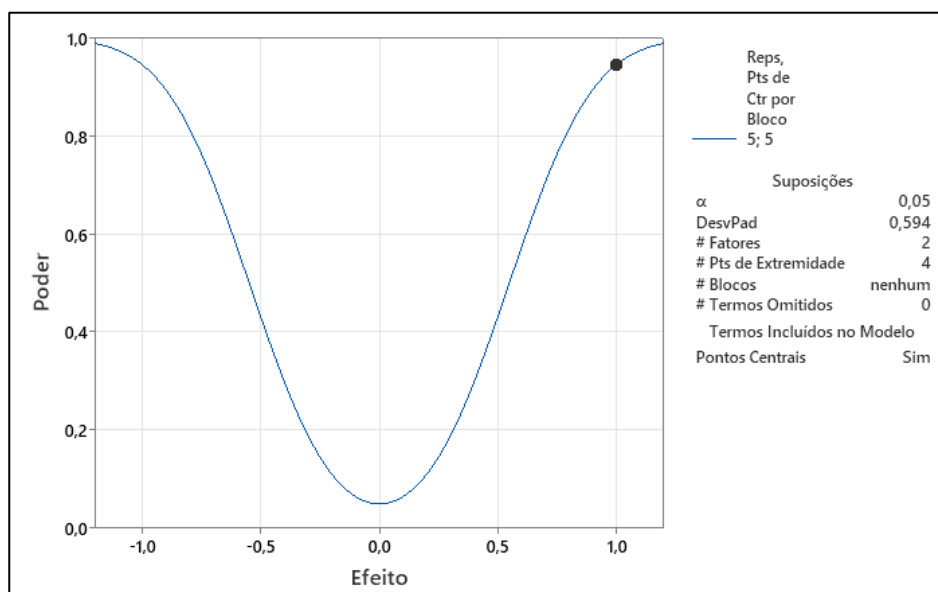


Figura 6.19 - Curva de Poder para a presente definição do DOE do Processo P01/02

Este Desenho Fatorial Completo passa então a ser do tipo $2^k + 1$, dado a introdução de pontos centrais. Como se realizam 5 réplicas, o número de experiências a realizar é de 25, incluindo os 5 pontos centrais. É de realçar que nesta análise os termos presentes no modelo possuem interações até à ordem 2.

De modo a concretizar da melhor forma os 2 níveis é necessário realizar alguma análise. Como é possível ver no item 6.1, mesmo com uma quantidade de componentes grande, não existem peças cujas variáveis significativas cubram toda a tolerância. Porém, destas dependências em relação às limitações dos processos em questão, a qualidade dos dados é um fator determinante para o desempenho do DOE [69], [71].

Deste modo, para melhorar o *input* de dados do DOE, tentando ter toda a amplitude de tolerância das cotas possível, recorre-se à maquinação de componentes. Contudo, revela-se uma técnica morosa e com algumas limitações, na medida em que no caso dos furos (*Plate* e *Frame*) não é viável acrescentar material e diminuir a cota e, no caso dos componentes de inserção (*Core* e *Bushing*) não é viável acrescentar material e aumentar a cota, sob pena de introduzir mais esforço mecânico no processo, o que leva à existência de mais ruído, ou seja, mais variabilidade, no processo. Desde modo, apesar de não se possuir componentes de *Core* e *Bushing* na tolerância máxima, e componentes de *Frame* e *Plate* tão idealmente perto da tolerância mínima como seria desejado, não é realizada nenhuma maquinação. Depois, quanto a peças de *Core* e *Bushing* na tolerância mínima e peças de *Frame* na tolerância máxima, considera-se não ser necessário a maquinação. Finalmente, para peças de *Plate* na tolerância máxima, existindo essa possibilidade, considera-se de valor executar uma maquinação

em algumas peças. Toda esta interpretação dos dados pode ser suportada pelas figuras C.1 a C.20, presentes no Apêndice C.

A maquinação realizada teve assim por objeto as *Plates*, algo que se revela bastante útil, na medida em que todas as 150 *Plates* recolhidas se encontram abaixo do seu valor nominal na cota significativa em questão (cota 1). Deste modo, possuindo as peças necessárias para o nível baixo, maquinam-se 10 *plates* para o nível alto (limite superior de tolerância) e 5 *plates* para o valor entre níveis (para usar nos valores centrais, como clarificado de seguida).

Deste modo, consegue-se introduzir mais variabilidade no modelo e aproximar o mesmo da realidade, tendo em conta que num espectro de tempo mais elevado os lotes podem variar ao longo de todas as tolerâncias.

Por forma a averiguar um possível impacto desta maquinação realizada nas peças é utilizado um microscópio digital, onde se compara a zona de interferência das *Plates* e respetivo centramento do furo. Todas as *Plates* maquinadas foram observadas ao microscópio, estando na figura 6.20 e 6.21 um exemplo de uma *Plate* sujeita a maquinação, e um exemplo de uma não maquinada, respetivamente. É possível observar, tanto a nível visual, como a nível quantitativo (comprimento do raio e chanfro) que a maquinação não introduziu alterações significativas que possam causar defeitos e imperfeições, como rebarbas, rugosidades, estrias, arestas vivas ou outras deformações que introduziriam variabilidade no processo.

De notar que as réplicas em causa não têm o valor exatamente igual entre elas, uma vez que dentro da amostra não existe por vezes a possibilidade de garantir esta condição com um rigor extremo, ao mesmo tempo que se impõe dentro do possível que as outras variáveis dimensionadas nos componentes fiquem o mais constantes possível.

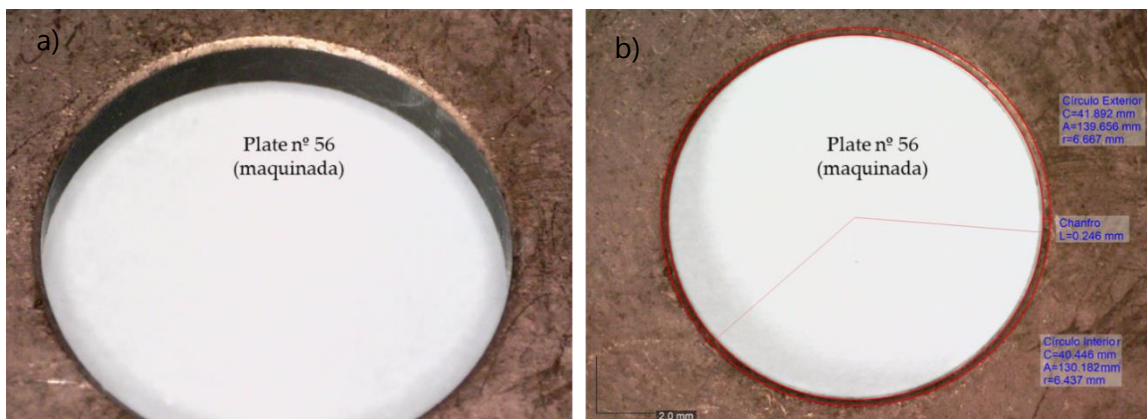


Figura 6.20 - *Plate* sujeita a maquinação, com a) vista diagonal, b) vista de topo

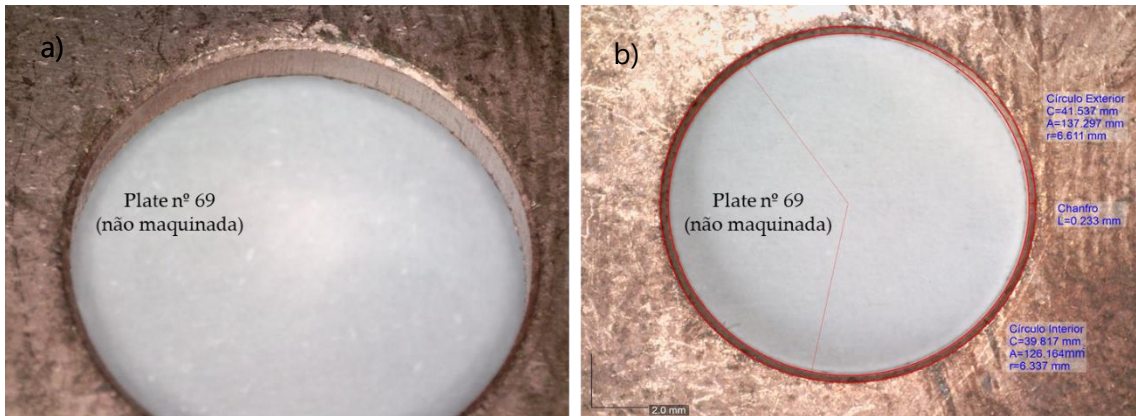


Figura 6.21 - *Plate* não sujeita a maquinação, com a) vista diagonal, b) vista de topo

Com todo o planeamento realizado, são executadas as experiências, de forma aleatória, definida pelo Minitab (tabela 6.10).

Tabela 6.10 - Ordem de execução dos DOE para ambos os processos

Ensaio	Processo P01/02		Processo P06	
	Diâmetro <i>Frame</i>	Diâmetro <i>Bushing</i>	Diâmetro <i>Core</i>	Diâmetro do furo da <i>Plate</i>
1	-	-	+	+
2	+	-	-	-
3	-	-	-	+
4	-	+	+	-
5	-	-	+	-
6	+	+	+	+
7	+	-	+	-
8	-	+	0	0
9	-	+	+	+
10	0	0	-	-
11	+	+	+	+
12	+	+	+	-
13	-	-	0	0
14	-	+	+	+
15	+	+	-	+
16	-	+	-	+
17	+	+	-	-
18	+	-	-	+
19	0	0	+	-
20	0	0	-	+
21	0	0	0	0
22	+	-	0	0
23	+	-	-	-
24	0	0	0	0
25	-	-	-	-

Apesar de realizados DOE para todas as respostas enunciadas ao longo do estudo (tabela 6.2), importa agora na fase de definição de modelos para os processos, definir a abordagem a tomar. De todas as respostas, para ambos os processos, o Valor na Linha de Controlo X representa a nível de resultados, a maior significância a nível de modelo linear. Como é possível analisar através do resumo dos modelos de regressão fatorial obtidos com os DOE realizados (tabela 6.11), esta variável de resposta obteve valores de R2 bastante elevados, o que revela uma que as variações das variáveis significativas explicam uma grande percentagem da variabilidade da resposta em questão. Para além disso, obteve modelos capazes de prever com bastante capacidade o *output* dos processos, com R2 preditos de 50,38% para o processo P01/02, e de 69,24% para o processo P06.

Tabela 6.11 - Sumário do Modelo de Regressão Fatorial obtido com todos os DOE realizados

		Sumário do Modelo			
Resposta		S	R2	R2 (aj.)	R2 (pred)
Processo P01/02	Força de Retenção	185,426	41,92%	30,30%	9,24%
	Valor Linha de Controlo X	0,478095	68,24%	61,89%	50,38%
	Valor Linha de Controlo Y	0,0266023	10,25%	0,00%	0,00%
Processo P06	Força de Retenção	100,278	83,34%	80,01%	73,97%
	Valor Linha de Controlo X	0,291131	80,31%	76,37%	69,24%
	Planicidade da <i>Plate</i>	0,103145	15,98%	0,00%	0,00%

Adicionalmente, a Força de Retenção também proporciona um modelo nestes moldes para o processo P06. No entanto, deve ser tida alguma precaução no que toca aos valores desta resposta. Por se tratar de um teste destrutivo, este está associado a muita variabilidade e erro de medição. Estudando tanto os resultados obtidos previamente como os obtidos com o DOE, é possível concluir que esta resposta é bastante inconstante em relação aos resultados que produz.

Quanto ao Valor na Linha de Controlo Y, ao analisar a parametrização atual da prensa, estando esta em perfil de deslocamento (avanço do punção), isto pode contribuir significativamente para que exista uma normalização deste Valor na Linha de Controlo Y, uma vez que independentemente da peça em questão, o deslocamento do punção é definido sempre até determinada coordenada. Sendo o processo sempre muito semelhante em todas as peças, isto tira a capacidade ao modelo para determinar significância na variabilidade desta resposta.

Já a Planicidade da *Plate*, tendo por base todos os estudos realizados, é possível concluir que não existe nenhuma variável que tenha sido dimensionada que explique significativamente a variabilidade que existe na resposta (valor-p menor que 0,05).

Com base em tudo isto, e no facto de a resposta Valor na Linha de Controlo X constituir, de entre todos, o controlo mais relevante que é realizado aos processos em questão, dado o *design* atual dos mesmos, a modelação dos processos tem por base os resultados obtidos no DOE para essa resposta. De notar que são executados todos os controlos de processo requeridos, sendo que não é encontrada nenhuma não conformidade.

6.2.2.1 Regressão Fatorial: Valor na Linha de Controlo X (kN) - Processo P01/02

Com base nos resultados obtidos, e analisando a tabela 6.12, é possível concluir que: a alteração prevista na resposta média quando o termo Diâmetro do *Bushing* aumentar em uma unidade codificada é superior e de sentido inverso à que acontece com o Diâmetro da *Frame*, quanto este termo aumenta em uma unidade codificada (na figura 6.25 é possível verificar este fenómeno, com a representação dos efeitos); os coeficientes significativos são os do Diâmetro do *Bushing* e do Diâmetro da *Frame* (valor-p $\leq 0,05$); os preditores não são correlacionados, uma vez que o valor de VIF é igual a 1.

Tabela 6.12 - Tabela de Coeficientes Codificados (DOE Processo P01/02)

Termo	Efeito	Coefficiente	Erro Padrão Coeficiente	Valor-T	Valor-p	VIF
Constante		6,598	0,107	61,71	0,000	-
Diâmetro <i>Frame</i>	-0,713	-0,357	0,107	-3,34	0,003	1
Diâmetro <i>Bushing</i>	1,103	0,551	0,107	5,16	0,000	1
Diâmetro <i>Frame</i> * Diâmetro <i>Bushing</i>	-0,235	-0,117	0,107	-1,10	0,285	1
Pt Ct		0,481	0,239	2,01	0,058	1

Tabela 6.13 - ANOVA do Valor na Linha de Controlo X (DOE Processo P01/02)

Fonte	SS (Aj.)	g.l.	MS (Aj.)	F_0	Valor-p
Modelo	9,8244	4	2,4561	10,75	0,000
Linear	8,6237	2	4,3119	18,86	0,000
Diâmetro <i>Frame</i>	2,5440	1	2,5440	11,13	0,003
Diâmetro <i>Bushing</i>	6,0797	1	6,0797	26,60	0,000
Interações de 2 fatores	0,2754	1	0,2754	1,20	0,285
Diâmetro <i>Frame</i> * Diâmetro <i>Bushing</i>	0,2754	1	0,2754	1,20	0,285
Curvatura	0,9253	1	0,9253	4,05	0,058
Erro	4,5715	20	0,2286		
Total	14,3959	24			

Para além disso, estudando a tabela 6.13, é possível concluir que não existe evidências conclusivas de que possa existir curvatura neste modelo, uma vez que o valor-p é maior ou igual a 0,05. Deste modo, considera-se que um modelo linear é bom o suficiente para descrever as relações existentes, pelo que é possível eliminar este termo dos modelos, bem como a interação entre os fatores, por igual motivo (como é possível confirmar através da figura 6.22). Assim é necessário obter uma modelação diferente da que origina a seguinte formulação:

Valor na Linha de Controlo X

$$= 6,598 - 0,357 * \text{Diâmetro Frame} + 0,551 * \text{Diâmetro Bushing} - 0,117 \text{ Diâmetro Frame} * \text{Diâmetro Bushing} + 0,481 * \text{Pt Ct} \quad (6.1)$$

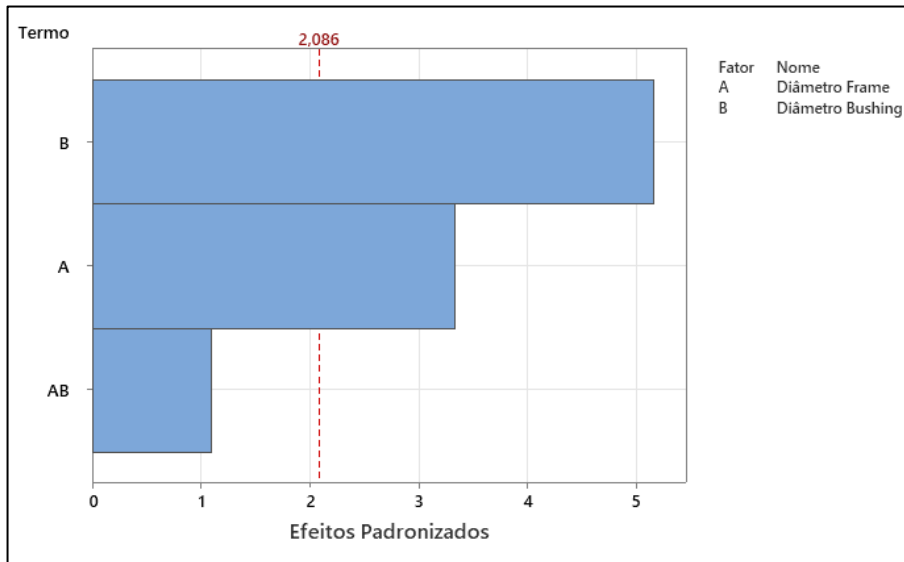


Figura 6.22 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados (Valor na Linha de Controlo X, DOE - Processo P01/02)

Todo este estudo é realizado mediante a Análise de Resíduos. Como se pode analisar, o pressuposto de normalidade é cumprido, uma vez que o valor-p é maior ou igual a 0,05 (figura 6.23).

Adicionalmente, como se pode observar na figura 6.24, o pressuposto da homogeneidade é cumprido, uma vez que o gráfico não apresenta nenhuma estrutura especial. É possível também concluir que o pressuposto da independência dos resíduos é cumprido uma vez que o resultado do gráfico correspondente não evidencia nenhuma tendência especial.

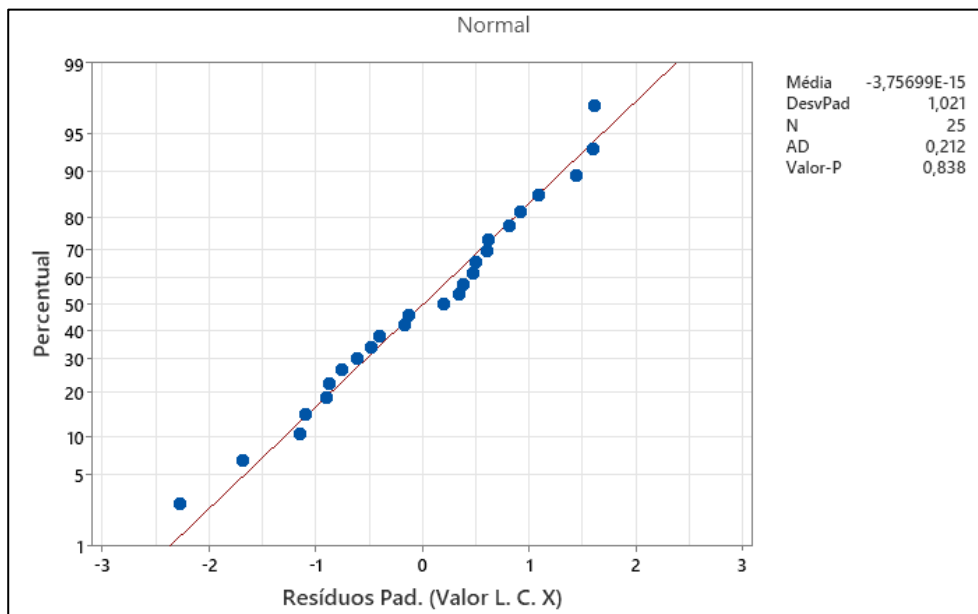


Figura 6.23 - Verificação de Normalidade (Valor na Linha de Controlo X, DOE - P01/02)

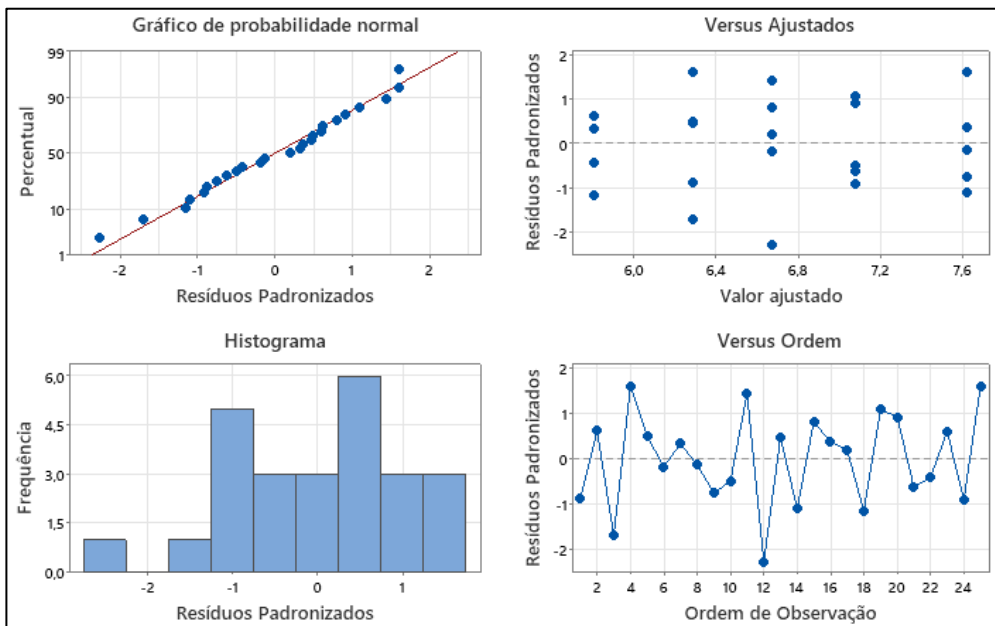


Figura 6.24 - Gráficos de Resíduos para a Valor na Linha Controlo X (DOE, Processo P01/02)

Para além disso, é possível, através de um gráfico fatorial de efeitos (figura 6.25), verificar os efeitos de interação aparentes. É possível verificar visualmente que o efeito do Diâmetro do Bushing é superior, tal como se confirmou na tabela 6.12.

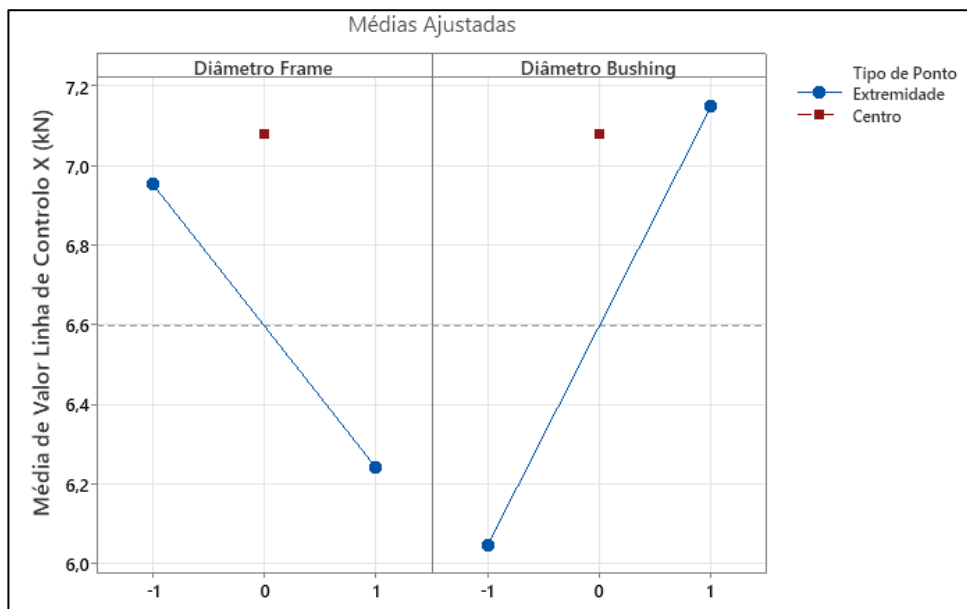


Figura 6.25 - Gráfico Fatorial de Efeitos para Valor na Linha de Controlo X (DOE - Processo P01/02)

Deste modo, com base nas conclusões reunidas, utilizando o mesmo procedimento (iteração 2), mas agora impondo o método de regressão *stepwise*, com alfa de entrada e de saída de 0,05 ficamos com a seguinte formulação que modela o processo P01/02:

$$\begin{aligned} \text{Valor na Linha de Controlo } X \\ = 6,694 - 0,357 * \text{Diâmetro Frame} + 0,551 * \text{Diâmetro Bushing} \end{aligned} \quad (6.2)$$

O nível de confiança é definido a 0,05, um valor convencionalmente adotado na comunidade científica [103]. Porém, o modelo foi executado com recurso a valores codificados, com o objetivo de ser possível comparar, numa escala comum, a magnitude dos coeficientes, permitindo determinar qual o fator com maior impacto na resposta. Conseqüentemente, para utilizar o modelo, seria necessária uma transformação dos dados das cotas dos componentes para os valores usados de -1 e +1, o que não se revela prático, pelo que é repetido o processo, utilizando os valores não codificados das variáveis de entrada, de onde se obtém a seguinte equação:

$$\begin{aligned} \text{Valor na Linha de Controlo } X \\ = -46 - 39,6 \times \text{Diâmetro Frame} + 42,90 \times \text{Diâmetro Bushing} \end{aligned} \quad (6.3)$$

De notar que estas análises finais estão também conforme em todos os pressupostos da Análise de Resíduos.

6.2.2.2 Regressão Fatorial: Valor na Linha de Controlo X (kN) - Processo P06

Com base nos resultados obtidos (tabela 6.14) é possível concluir que: a alteração prevista na resposta média quando o termo Diâmetro da *Plate* aumentar em uma unidade codificada é superior e de sentido inverso à que acontece com o Diâmetro da *Core*, quanto este termo aumenta em uma unidade codificada (na figura 6.29 é possível verificar este fenómeno); os coeficientes significativos são os do Diâmetro da *Plate* (valor-p $\leq 0,05$); os preditores não são correlacionados, uma vez que o valor de VIF é igual a 1.

Tabela 6.14 - Tabela de Coeficientes Codificados (DOE Processo P06)

Termo	Efeito	Coeficiente	Erro Padrão Coeficiente	Valor-T	Valor-p	VIF
Constante		4,9878	0,0651	76,62	0,000	-
Diâmetro <i>Core</i>	-0,2199	0,1100	0,0651	1,69	0,107	1
Diâmetro do furo da <i>Plate</i>	-1,1551	-0,5775	0,0651	-8,87	0,000	1
Diâmetro <i>Core</i> * Diâmetro do furo da <i>Plate</i>	0,0015	0,0007	0,0651	0,01	0,991	1
Pt Ct		0,018	0,146	0,12	0,902	1

Tabela 6.15 - ANOVA do Valor na Linha de Controlo X (DOE Processo P06)

Fonte	SS (Aj.)	g.l.	MS (Aj.)	F_0	Valor-p
Modelo	6,91439	4	21,72860	20,39	0,000
Linear	6,91306	2	3,45653	40,78	0,000
Diâmetro <i>Core</i>	0,24178	1	0,24178	2,85	0,107
Diâmetro do furo da <i>Plate</i>	6,67128	1	6,67128	78,71	0,000
Interações de 2 fatores	0,00001	1	0,00001	0,00	0,991
Diâmetro <i>Core</i> * Diâmetro do furo da <i>Plate</i>	0,00001	1	0,00001	0,00	0,991
Curvatura	0,00132	1	0,00132	0,02	0,902
Erro	1,69514	20	0,08476		
Total	8,60953	24			

Para além disso, estudando a tabela 6.15, é possível concluir que não existe evidências conclusivas de que possa existir curvatura neste modelo, uma vez que o valor-p é maior ou igual a 0,05. Deste modo, considera-se que um modelo linear é bom o suficiente para descrever as relações existentes, pelo que é possível eliminar este termo dos modelos, bem como a interação entre os fatores, por igual motivo. O termo Diâmetro do *Core*, ao contrário do expectável, também se resolve como não significativo, pelo que se remove do modelo também. Esta análise é também suportada com base na figura 6.26. Assim é necessário obter uma modelação diferente da que origina a seguinte formulação.

Valor na Linha de Controlo X

$$= 4,9878 + 0,11 * \text{Diâmetro Core} - 0,5775 * \text{Diâmetro do furo da Plate} \quad (6.4) \\ + 0,0007 \text{ Diâmetro Core} * \text{Diâmetro do furo da Plate} + 0,018 * Pt Ct$$

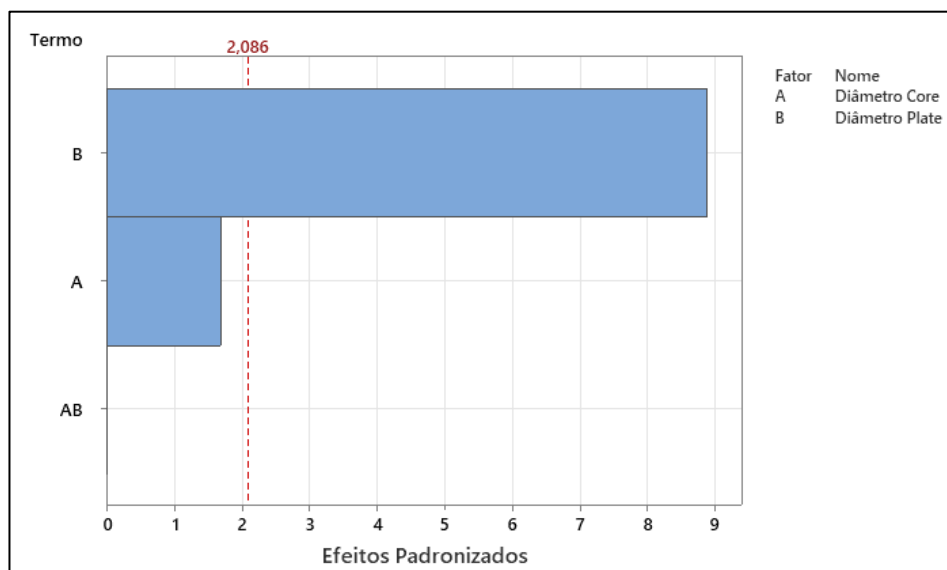


Figura 6.26 - Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados (Valor na Linha de Controlo X, DOE - Processo P06)

Todo este estudo é realizado mediante a Análise de Resíduos. Como se pode analisar, o pressuposto de normalidade é cumprido, uma vez que o valor-p é maior ou igual a 0,05 (figura 6.27).

Adicionalmente, como se pode observar na figura 6.28, o pressuposto da homogeneidade é cumprido, uma vez que o gráfico não apresenta nenhuma estrutura especial. É possível também concluir que o pressuposto da independência dos resíduos é cumprido uma vez que o resultado do gráfico correspondente não evidencia nenhuma tendência especial.

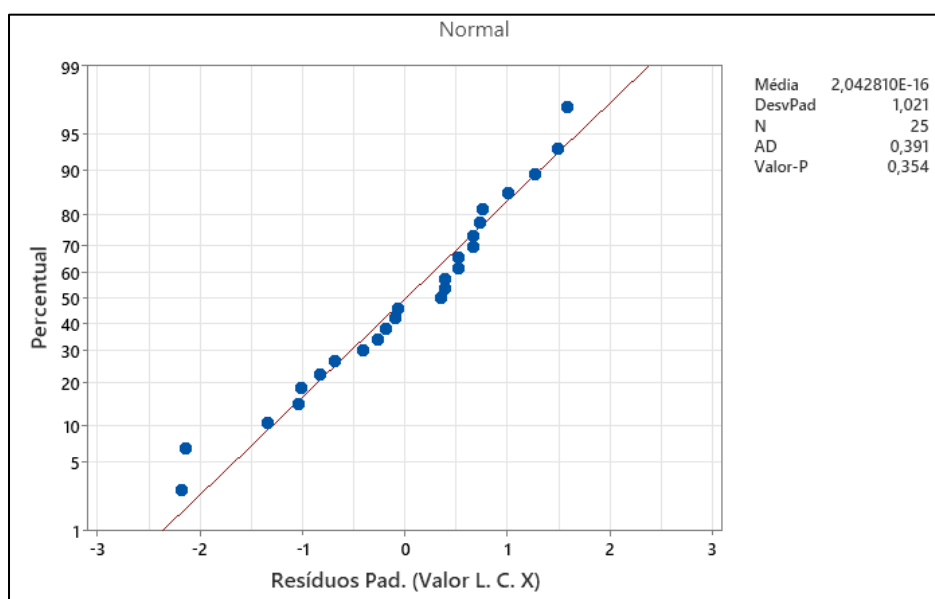


Figura 6.27 - Verificação de Normalidade (Valor na Linha de Controlo X, DOE - P06)

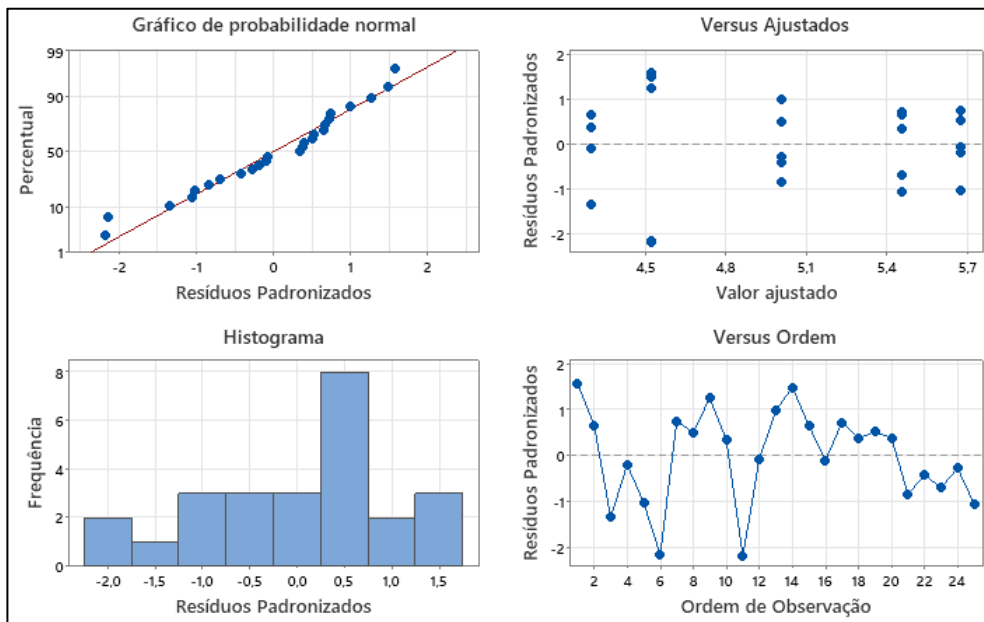


Figura 6.28 - Gráficos de Resíduos para a Valor na Linha Controle X (DOE, Processo P06)

Para além disso, é possível, através de um gráfico fatorial de efeitos (figura 6.29), verificar os efeitos de interação aparentes. É possível verificar visualmente que o efeito do Diâmetro da Plate é superior, tal como se confirmou na tabela 6.14.

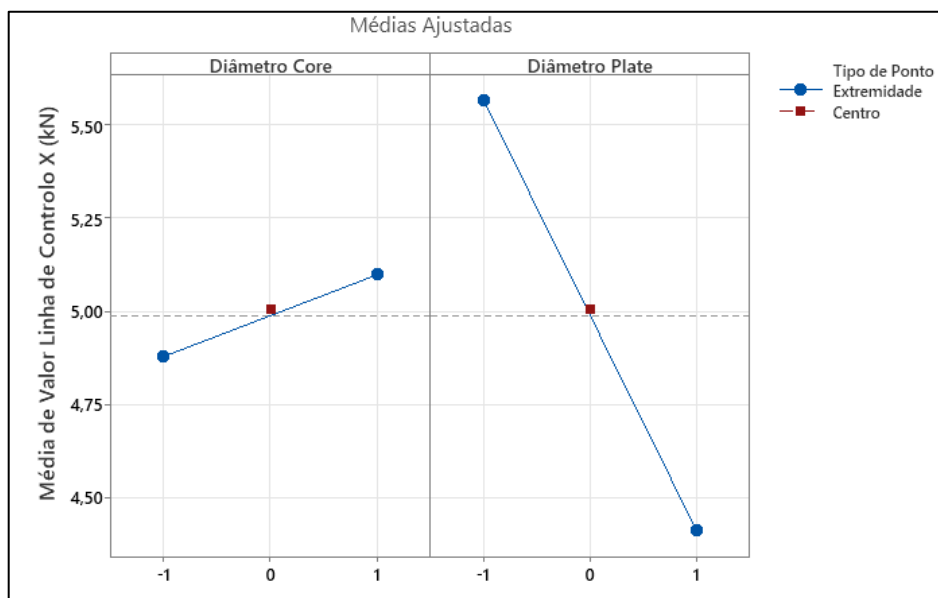


Figura 6.29 - Gráfico Fatorial de Efeitos para Valor na Linha de Controle X (DOE - Processo P06)

Deste modo, com base nas conclusões reunidas, utilizando o mesmo procedimento (iteração 2), mas agora impondo o método de regressão *Stepwise*, com alfa de entrada e de saída de 0,05 ficamos com a seguinte equação que modela o processo P06:

$$\text{Valor na Linha de Controlo } X = 4,9915 - 0,5776 * \text{Diâmetro Plate} \quad (6.5)$$

Porém, mais uma vez, o modelo foi executado com recurso a valores codificados, pelo que é repetido o processo, utilizando os valores não codificados das variáveis de entrada, de onde se obtém a seguinte formulação:

$$\text{Valor na Linha de Controlo } X = 371,3 - 29,12 * \text{Diâmetro Plate} \quad (6.6)$$

De notar que estas análises finais estão também conforme em todos os pressupostos da Análise de Resíduos.

Em suma, é possível concluir que foi possível obter modelos com uma capacidade de previsão bastante significativa daquilo que é *output* dos processos, utilizando equações otimizadas que utilizam o menor número possível de variáveis (tabela 6.16 e figuras 6.30 e 6.31).

Tabela 6.16 - Sumário e comparação dos modelos obtidos

		Sumário do Modelo			
Iteração		S	R2	R2 (aj.)	R2 (pred)
Processo P01/02	1	0,478095	68,24%	61,89%	50,38%
	2 (valores codificados)	0,512222	59,90%	56,26%	48,34%
	2 (valores não codificados)	0,493603	62,77%	59,38%	51,85%
Processo P06	1	0,291131	80,31%	76,37%	69,24%
	2 (valores codificados)	0,290296	77,49%	76,51%	73,03%
	2 (valores não codificados)	0,263211	82,30%	80,69%	77,03%

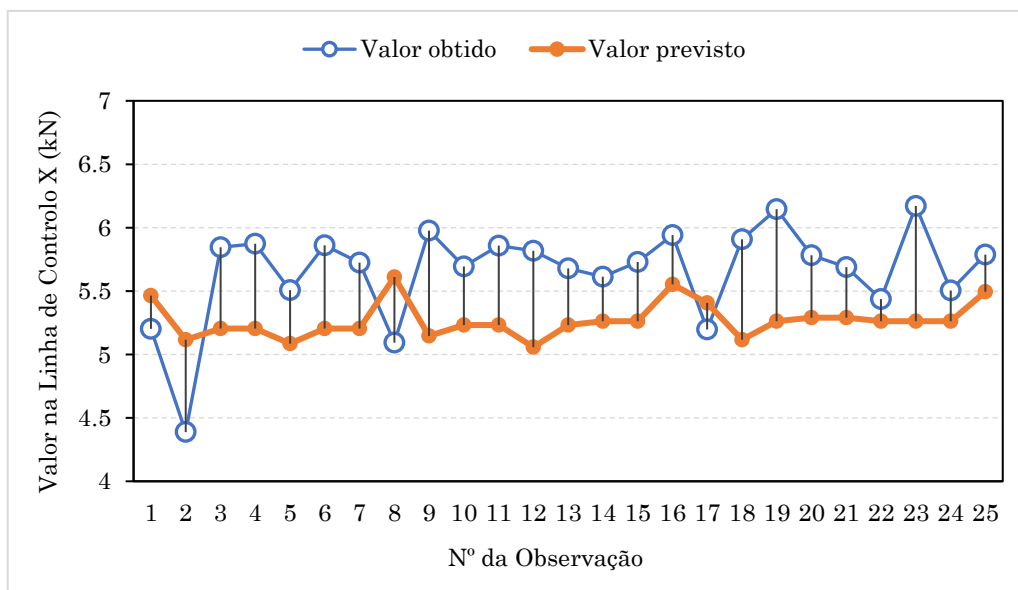


Figura 6.30 - Comparação entre valor obtido na montagem versus valor previsto pelo modelo (Processo P06)

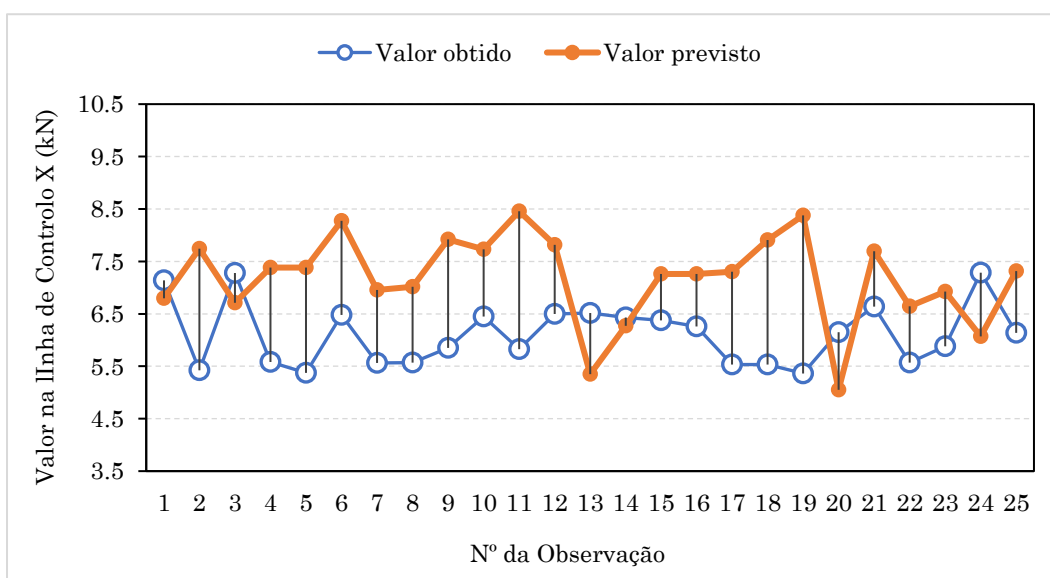


Figura 6.31 - Comparação entre valor obtido na montagem versus valor previsto pelo modelo (Processo P01/02)

Um exercício que é feito, consiste na comparação entre o valor obtido nas 25 montagens efetuadas nos estudos preliminares, com o valor previsto pelos modelos agora obtidos. Quanto ao Processo P06, visível na figura 6.30, é visível uma capacidade de previsão bastante satisfatória, sendo notório o significativo valor de R2 predito, com a previsão a se revelar, de modo relativamente constante, inferior ao valor real obtido. Já no Processo P01/02, visível na figura 6.31, também existe uma boa capacidade de previsão. No entanto, em conformidade com o facto do R2 predito ser menor do que no anterior processo, o desvio em relação ao valor real obtido já se verifica ligeiramente superior, em média. Este valor previsto que se revela, de modo relativamente constante, superior ao valor real obtido.

Como é possível concluir, apesar de no caso do Processo P01/02, a capacidade de previsão ser marginalmente inferior na iteração 2 (valores codificados) em comparação com a iteração 1, é de realçar que a modelação obtida otimiza aquilo que é a utilização prática da mesma, no sentido em que torna possível prever o *output* dos processos com a introdução do menor número variáveis, e por isso, de uma forma mais eficiente, eficaz e económica.

Adicionalmente, com a representação dos efeitos realizada nas figuras 6.25 e 6.29, é possível concluir e identificar pontos comuns entre aquilo que representam ambos os processos, na medida em que no comportamento de ambos, um furo de maior diâmetro, ou uma peça de inserção com menor diâmetro, impõem ao processo a necessidade de uma menor força.

6.3 Validação e Discussão de Resultados

De modo a demonstrar a eficácia e confiabilidade do método é realizada uma validação, executada no produto EVC 250. Este produto, é em toda a sua caracterização bastante semelhante ao estudado EVC 175. A aplicação é fundamentalmente a mesma, com a nuance do EVC 250 ser dirigido para correntes contínuas de 250A (a 85° C), e ter uma capacidade de curto-circuito de correntes de transporte de até 6kA (com capacidade para 20ms deste pico máximo). Sendo a origem do EVC 175 baseada no EVC 250, este último é também um contador de alta tensão DC (até 500VDC), mas de dimensões superiores, com 93 x 55,3 x 49,8 mm (figura 6.32).

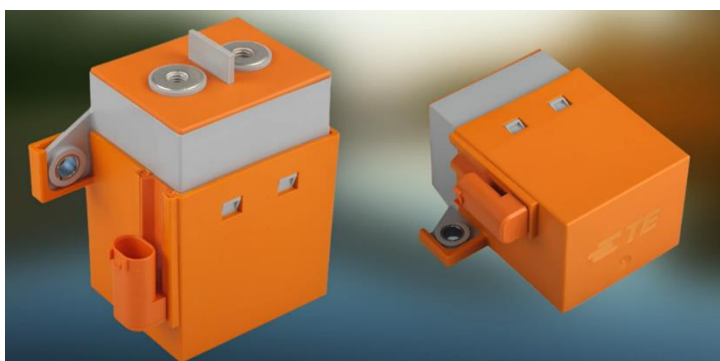


Figura 6.32 - Ilustração do EVC 250

Sendo assim, a validação realizada tem por base o Processo P01/02, mas neste produto. Como é possível ver na figura 6.33, tanto os componentes para o Processo P06 como os para o Processo P01/02, são bastante idênticos aos seus equivalentes, no EVC 175. De notar que tanto a caracterização do processo como das curvas força-deslocamento seguem por isso padrões muito similares ao registados para o EVC 175.

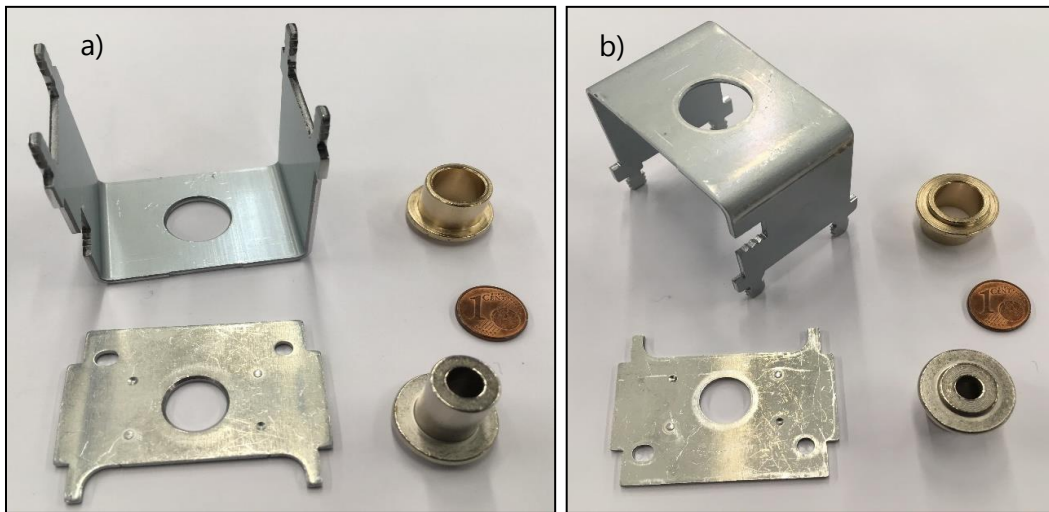


Figura 6.33 - Componentes dos Processos P06 e P01/02 (EVC 250). a) vista superior, b) vista inferior

O objetivo passa assim por confirmar noutro produto as relações identificadas nas modelações realizadas. De realçar que esta análise se enquadra num estudo realizado acerca de uma alteração potencial a realizar no revestimento de superfície dos *Bushings*. O estudo consiste em realizar 15 montagens do processo P01/02 do EVC 250, utilizando *Bushings* com 3 tipos de revestimentos (5 de cada), e averiguar a força máxima obtida na curva força-deslocamento. Realizou-se assim, com estes dados, uma análise de regressão e de variância, nas quais se obteve as relações descritas nas figuras 6.34 e 6.35.

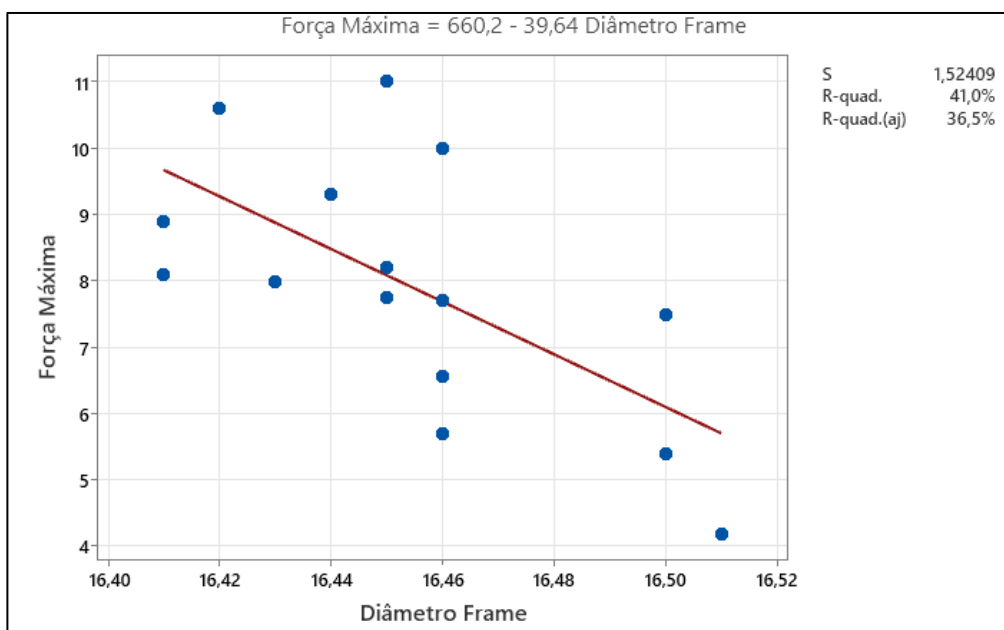


Figura 6.34 - Gráfico de linha ajustada entre *output* e Diâmetro da *Frame*

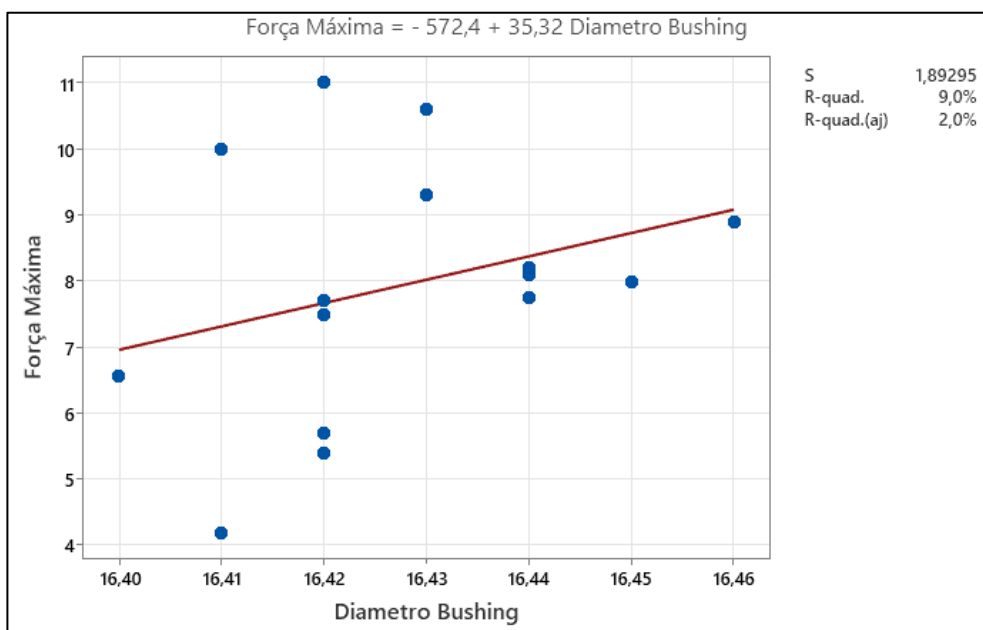


Figura 6.35 - Gráfico de linha ajustada entre *output* e Diâmetro do *Bushing*

É possível concluir que, apesar de o objeto deste estudo incluir diferentes tipos de *Bushing*, o que afeta bastante a qualidade da relação que se obtêm (como se vê na figura 6.35), e apesar de incidir sobre uma característica diferente da curva de força-deslocamento e ter uma amostra pequena, as relações entre variáveis de *input* e de *output* são concordantes com as obtidas nos modelos.

Pode-se assim evidenciar que existe uma correspondência no que toca aos *press-fit*, na medida em que a análise realizada demonstra que este tipo de processos possui um comportamento que segue determinados padrões, quer seja entre processos de um mesmo produto, ou em entre processos análogos em produtos diferentes.

Observa-se que todos os processos de *press-fit* estudados revelaram ter não só cotas equivalentes como características significativas, como ainda um equivalente comportamento do processo em relação às mesmas, na medida em que um furo de maior diâmetro, ou uma peça de inserção com menor diâmetro, impõem ao processo a necessidade de uma menor força, sempre com semelhantes quantificações de causalidade nos modelos.

Comprova-se assim que a metodologia efetuada se revela uma mais-valia no que toca à realização de uma previsão acerca do impacto da variabilidade geométrica dos componentes na estabilidade dos processos. Os modelos em causa podem ainda ser alvo de uma melhoria contínua, uma vez que se espera que com a incorporação de mais dados, de qualidade, a sua capacidade de previsão aumente, otimizando a capacidade destes modelos de padronizar famílias de processos.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, são expostas as conclusões gerais deste trabalho, assim como algumas recomendações que podem ser tidas em consideração para trabalhos futuros.

7.1 Conclusões gerais

A presente dissertação teve como objetivo principal a previsão e padronização de processos de *press-fit* em contadores, utilizando o desenho de experiências.

O estudo foca-se num produto bastante complexo, o EVC, um contador destinado ao mercado dos veículos elétricos e, por isso, um produto onde a variabilidade é abundante ao longo da cadeia de valor, dada a fase de elevado crescimento que o aumento de procura atual impõe. Com base nisto, foi realizada uma análise em relação ao impacto da variabilidade na implementação da padronização nos sistemas de produção deste produto.

Um dos procedimentos pilar nestes sistemas consiste no sistema de validação dos processos, ou seja, na definição de limites associados aos mesmos. No entanto, sendo a matéria-prima uma das causas principais da variabilidade, é imposto, ao longo do tempo, uma necessidade de revalidação, na medida em que os lotes de material vão divergindo do lote original utilizado inicialmente para a definição de limites. Isto, que se revela um problema grave, na medida em que se perde o controlo sobre a estabilidade do processo, criando tanto situações de falta de qualidade, como um excesso de situações de falsos alarmes.

Assim, criou-se a necessidade de estudar e tentar prever em antemão a magnitude e o correspondente impacto da variabilidade geométrica dos componentes na estabilidade dos processos. Com este objetivo, foi tido como objeto de estudo dois processos de *press-fit*, que constituem um dos mais comuns processos no fabrico de um contador. Através da aplicação de conhecimentos de qualidade tais como a ANOVA, foi possível em ambos os processos, sempre com base em vários lotes de componentes, identificar quais as variáveis significativas a nível dimensional dos componentes.

Adicionalmente, e recorrendo à ferramenta do DOE, foi possível, com base nestas variáveis significativas, modelar os processos através de equações matemáticas que permitem prever e relacionar o comportamento dos mesmos, em função de apenas a variabilidade geométrica dos componentes de vários lotes, sempre numa ótica de padronização destes sistemas de metodologias de produção.

7.2 Crítica aos resultados obtidos

A nível da padronização de procedimentos neste sistema de produção, foi possível assim concluir em relação ao impacto da variabilidade dos componentes na implementação de sistemas de validação de processos. Ao quantificar o impacto da variância associada aos *inputs* na resposta de ambos os processos em estudo, é possível concluir que se deve fazer esforços no sentido de tornar estes procedimentos, nomeadamente a definição de limites de controlo, independente de 1 só lote. Foi possível verificar que ao introduzir vários lotes, o conhecimento extra que se obtém do processo permite evitar problemas que promovem eventuais iterações destes procedimentos de validação.

Com a modelação obtida dos processos, é possível prever atempadamente as alterações que as variações dos *inputs*, com os novos lotes, causam nos limites de processo. Utilizando as equações matemáticas obtidas, é possível prever e ajustar atempadamente todas as janelas e limites de um processo com base nos dados de vários lotes de componentes. Assim, foi possível aumentar a previsibilidade, o que a longo prazo se traduz numa redução tanto de custos de produção, na medida em que se previne a falha e se promove a estabilidade do processo, como de tempo e recursos associados aos procedimentos de validação recorrentes.

Ao optar por este tipo de abordagens de conhecimento e melhoria dos processos, foi possível tornar os mesmos capazes de absorver a variabilidade dos componentes. Deste modo, evita-se optar por soluções que envolvam uma maior exigência de rigor dimensional para com os fornecedores, que representam encargos financeiros bastante dispendiosos. Este conhecimento do processo, permite assim uma definição de requisitos a nível de tolerâncias mais otimizada, e averiguar em processos futuros e semelhantes o possível alargamento de tolerâncias não significativas, otimizando custos.

Com um conhecimento mais profundo acerca do comportamento dos processos, baseado em vários lotes e assim incorporando mais variabilidade, foi possível confirmar o valor de otimizar o procedimento de definição e validação de processo, na medida em este deve deixar de possuir dependência de 1 único lote.

Ao definir e modelar os processos para a amplitude das tolerâncias dos *inputs*, com base numa caracterização de vários lotes de componentes, foi possível prever, com boa significância, os *outputs* de ambos os processos estudados. Foi possível ainda evidenciar uma cor-

respondência entre os mesmos, na medida em que ambos revelaram ter não só cotas equivalentes como características significativas, como ainda um equivalente comportamento do processo em relação às mesmas.

Além disso, a informação e modelação obtida permite contribuir para um objetivo máximo de modelar e padronizar famílias de processos. Ao modelar processos semelhantes, é possível encontrar pontos de contacto e extrapolar relações e conhecimento entre os mesmos, de forma económica e eficaz, o que pode facilitar em muito aquilo que é o desenvolvimento de novos processos, a otimização de processos correntes, e os procedimentos de validação e parametrização dos mesmos.

Adicionalmente, a capacidade de prever várias características da curva de força-deslocamento associada aos processos, permitiu um grande suporte no que toca à escolha de equipamentos como prensas, na medida em que o modelo conseguiu prever qual a força necessária máxima. Ao quantificar a força necessária para a mais grave condição de interferência entre os componentes, foi possível evitar a compra de dispositivos sobredimensionados e, por isso, mais dispendiosos.

A realização do estudo apresentado permitiu assim concluir que a presença de uma cultura centrada na padronização aumenta ultimamente a flexibilidade de uma organização, potenciando a capacidade competitiva da mesma.

Apesar de tudo, o presente estudo foi sujeito a algumas limitações ao longo do seu desenvolvimento. A situação pandémica que se impôs durante a realização deste projeto impactou bastante a capacidade de resposta das equipas, inflacionando muito a duração de tarefas como a metrologia dos componentes. Para além disso, são impostas a este estudo naturais limitações a nível de custos. Custos relacionados a alocação de recursos ou a inatividade de postos de trabalho para elaborar tarefas do projeto foram sempre tidos em conta, de modo a serem planeados e otimizados.

7.3 Trabalhos e Passos Futuros

Com o decorrer do estudo, foi possível identificar e abrir caminho para novos trabalhos futuros que complementem e aprofundem o trabalho realizado, tais como:

- Análise do impacto da coercitividade dos materiais no processo. Apesar de ser uma característica controlada nos materiais, seria de grande valor acrescentado aprofundar ainda mais o conhecimento acerca dos possíveis impactos deste fator nos processos;
- Revestimento de superfície. Apesar de no estudo realizado não ter sido possível identificar nenhuma relação significativa, salienta-se a importância de trabalhar no sentido de aprofundar o conhecimento nesta temática;

- Análise de mais processos na perspectiva da abordagem utilizada, nomeadamente processos da mesma família que os estudados, com o objetivo final de criar uma base de dados e conhecimento que permita criar modelos transversais que englobem não só processos singulares, mas sim famílias de processos.

Para além disso, realça-se o facto de este tipo de modelações constituírem o passo de entrada para ambientes e temáticas como os sistemas de controlo adaptativo e a simulação, onde é possível escalar as conclusões obtidas a outro nível.

Ao integrar conhecimento intrínseco sobre os processos em equipamentos capazes de realizar uma avaliação em tempo real, constituindo sistemas de controlo fechado, onde se relaciona toda a informação, é possível atingir processos, onde, através de uma caracterização completa dos *inputs*, é possível ajustar janelas de controlo, à medida que estes variam ao longo do tempo. Deste modo, é promovido um controlo da estabilidade dos processos muito mais eficaz, que absorve toda a variabilidade das entradas. Salienta-se neste tópico a consideração de equipamentos capazes de determinar tolerâncias individuais das peças para incorporação nestes processos e sistemas, através do qual executam compensações inteligentes na quantificação dos *outputs* a apresentar.

Outra valência a explorar, onde é possível integrar as conclusões obtidas com o DOE, consiste na utilização da simulação, que extrapola todo o conhecimento obtido sobre o processo para conclusões precisas acerca do comportamento do material ao longo do mesmo. A simulação não só tornaria possível um maior controlo de fatores do ruído que possam existir, como permitiria perceber as eventuais influências que fatores como a morfologia da superfície, as propriedades dos materiais e as tensões existentes nos mesmos, influenciam os processos. Dada a dificuldade encontrada em simular todas as situações de montagem possíveis relativamente à tolerância dos materiais, confirma-se que a simulação poderia por certo colmatar estas falhas de informação.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Vijay and M. Gomathi Prabha, "Work standardization and line balancing in a windmill gearbox manufacturing cell: A case study," *Mater. Today Proc.*, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.584.
- [2] I. Antonioli, P. Guariente, T. Pereira, L. P. Ferreira, and F. J. G. Silva, "Standardization and optimization of an automotive components production line," *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 1120–1127, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.173.
- [3] S. Süß, T. Sobisch, W. Peukert, D. Lerche, and D. Segets, "Determination of Hansen parameters for particles: A standardized routine based on analytical centrifugation," *Adv. Powder Technol.*, vol. 29, no. 7, pp. 1550–1561, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.apt.2018.03.018.
- [4] P. E. C. Johansson, T. Lezama, L. Malmsköld, B. Sjögren, and L. M. Ahlström, "Current State of Standardized Work in Automotive Industry in Sweden," *Procedia CIRP*, vol. 7, pp. 151–156, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.05.026.
- [5] M. Míkva, V. Prajová, B. Yakimovich, A. Korshunov, and I. Tyurin, "Standardization – One of the Tools of Continuous Improvement," *Procedia Eng.*, vol. 149, pp. 329–332, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.674.
- [6] T. Kovacs, "Laser welding process specification base on welding theories," *Procedia Manuf.*, vol. 22, pp. 147–153, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.03.023.
- [7] A. Webmaster, "New Automotive Study Voices the Industry's View on Quality and a Strategic Path Forward." <https://www.aiag.org/about/news/2015/06/10/new-automotive-study-voices-the-industry-s-view-on-quality-and-a-strategic-path-forward> (accessed Nov. 29, 2021).
- [8] "Automotive Relay Market Forecast Report, 2019-2027." <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/automotive-relay-switch-market-13970338.html> (accessed Nov. 30, 2021).
- [9] "Fact.MR – Automotive Relay Market Forecast, Trend Analysis & Competition Tracking: Global Market insights 2017 to 2022." <https://www.factmr.com/report/18/automotive-relay-market> (accessed Nov. 29, 2021).
- [10] "Manufacturing statistics - NACE Rev. 2." https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Manufacturing_statistics_-_NACE_Rev_2 (accessed Nov. 29, 2021).
- [11] "Worldwide revenue from electric vehicles 2027," *Statista*. <https://www.statista.com/statistics/271537/worldwide-revenue-from-electric-vehicles-since-2010/> (accessed Nov. 29, 2021).
- [12] "Number of electric vehicles in use globally 2020-2030," *Statista*. <https://www.statista.com/statistics/970958/worldwide-number-of-electric-vehicles/> (accessed Nov. 29, 2021).
- [13] "Topic: Automotive electronics worldwide," *Statista*. <https://www.statista.com/topics/7983/automotive-electronics-worldwide/> (accessed Nov. 29, 2021).
- [14] "Automotive Relay Market Size, Share | Global Industry Report, 2025." <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/automotive-relay-market> (accessed Nov. 29, 2021).

- [15] "Automotive Relay Market | 2021 - 26 | Industry Share, Size, Growth - Mordor Intelligence." <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/automotive-relay-market> (accessed Nov. 29, 2021).
- [16] "Automotive Relay Market by Type, Ampere, Application, Vehicle Type, EV Relay Type, 48V Relay And Region - Global Forecast to 2027." https://www.reportlinker.com/p04975548/Automotive-Relay-Market-by-Type-Load-Application-ICE-EV-and-48V-Relay-Market-Global-Forecast-to.html?utm_source=PRN (accessed Nov. 29, 2021).
- [17] "Automotive Relay Market Global Industry Analysis, Size and Forecast, 2017 to 2027." <https://www.futuremarketinsights.com/reports/automotive-relay-market> (accessed Nov. 29, 2021).
- [18] B. Daniel, V. Kumar, and N. Omar, "Postgraduate conception of research methodology: implications for learning and teaching," *Int. J. Res. Method Educ.*, vol. 41, no. 2, pp. 220–236, Mar. 2018, doi: 10.1080/1743727X.2017.1283397.
- [19] S. Crowe, K. Cresswell, A. Robertson, G. Huby, A. Avery, and A. Sheikh, "The case study approach," *BMC Med. Res. Methodol.*, vol. 11, no. 1, p. 100, Jun. 2011, doi: 10.1186/1471-2288-11-100.
- [20] P. L. Mesquita and M. Missimer, "Social Sustainability Work in Product Development Organizations: An Empirical Study of Three Sweden-Based Companies," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, Art. no. 4, Jan. 2021, doi: 10.3390/su13041986.
- [21] M. Rossini, F. Audino, F. Costa, F. D. Cifone, K. Kundu, and A. Portioli-Staudacher, "Extending lean frontiers: a kaizen case study in an Italian MTO manufacturing company," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 104, no. 5, pp. 1869–1888, Oct. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03990-x.
- [22] L. Hunt, G. Thomson, K. Whittaker, and F. Dykes, "Adapting breastfeeding support in areas of socio-economic deprivation: a case study approach," *Int. J. Equity Health*, vol. 20, no. 1, p. 83, Mar. 2021, doi: 10.1186/s12939-021-01393-7.
- [23] R. K. Yin, *Case Study Research and Applications: Design and Methods*, 6th edition. Los Angeles: SAGE Publications, Inc, 2017.
- [24] A. Rondini, G. Pezzotta, S. Cavalieri, M.-Z. Ouertani, and F. Pirola, "Standardizing delivery processes to support service transformation: A case of a multinational manufacturing firm," *Comput. Ind.*, vol. 100, pp. 115–128, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.compind.2018.04.010.
- [25] K. Traub-Hoffmann, B. Furtmann, L. Laber, S. Helm, C. Geiger, and T. Bussemer, "Standardization of the Reconstitution Procedure of Protein Lyophilizates as a Key Parameter to Control Product Stability," *J. Pharm. Sci.*, vol. 109, no. 1, pp. 211–215, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.xphs.2019.10.032.
- [26] B. Rusjan and M. Kiauta, "Improving healthcare through process standardization: a general hospital case study," *Int. J. Health Care Qual. Assur.*, vol. 32, no. 2, pp. 459–469, Jan. 2019, doi: 10.1108/IJHCQA-06-2018-0142.
- [27] L. K. Sullivan *et al.*, "Development of a Standardize Case Review Process Across a Health System," *Am. J. Infect. Control*, vol. 48, no. 8, Supplement, p. S43, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ajic.2020.06.046.
- [28] Nickson. M. Karie, V. R. KEBANDE, H. S. Venter, and K.-K. R. Choo, "On the importance of standardising the process of generating digital forensic reports," *Forensic Sci. Int. Rep.*, vol. 1, p. 100008, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.fsir.2019.100008.

- [29] F. Rahimi, C. Møller, and L. Hvam, "Succeeding in process standardization: Explaining the fit with international management strategy," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 22, no. 6, pp. 1212–1246, Jan. 2016, doi: 10.1108/BPMJ-12-2015-0180.
- [30] R. J. Kauffman and J. Y. Tsai, "With or without you: The countervailing forces and effects of process standardization," *Electron. Commer. Res. Appl.*, vol. 9, no. 4, pp. 305–322, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.elerap.2009.11.009.
- [31] B. Muenstermann, A. von Stetten, S. Laumer, and A. Eckhardt, "The performance impact of business process standardization: HR case study insights," *Manag. Res. Rev.*, vol. 33, no. 9, pp. 924–939, Jan. 2010, doi: 10.1108/01409171011070332.
- [32] X. Xia, J. T. Tobin, P. Sharma, M. Fenelon, P. L. H. McSweeney, and J. J. Sheehan, "Application of a cascade membrane filtration process to standardise serum protein depleted cheese milk for cheddar cheese manufacture," *Int. Dairy J.*, vol. 110, p. 104796, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.idairyj.2020.104796.
- [33] H. Rodrigues, F. J. G. Silva, L. G. Morgado, J. C. Sá, L. P. Ferreira, and R. D. S. G. Campilho, "A novel computer application for scrap reporting and data management in the manufacturing of components for the automotive industry," *Procedia Manuf.*, vol. 51, pp. 1319–1326, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.184.
- [34] D.-H. Shin, H. Kim, and J. Hwang, "Standardization revisited: A critical literature review on standards and innovation," *Comput. Stand. Interfaces*, vol. 38, pp. 152–157, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.csi.2014.09.002.
- [35] D. K. Patel and S. P. Dhanabal, "Determination of bioanalytical parameters for the standardization of *Abroma augusta*," *J. Acute Dis.*, vol. 2, no. 4, pp. 292–295, Jan. 2013, doi: 10.1016/S2221-6189(13)60146-8.
- [36] E. G. Segovia-Eulogio, J. Torres, J. Carbajo, J. Ramis, and J. P. Arenas, "Determination of the elastic parameters of a material from a standardized dynamic stiffness testing," *J. Sound Vib.*, vol. 460, p. 114885, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jsv.2019.114885.
- [37] I. C. Nunes, E. Kohlbeck, F. H. Beuren, A. B. Fagundes, and D. Pereira, "Life cycle analysis of electronic products for a product-service system," *J. Clean. Prod.*, vol. 314, p. 127926, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127926.
- [38] T. Bayerl, M. Duhovic, P. Mitschang, and D. Bhattacharyya, "The heating of polymer composites by electromagnetic induction – A review," *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 57, pp. 27–40, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.compositesa.2013.10.024.
- [39] A. Karpatne, D. Breden, and L. Raja, "Simulation of Arc Quenching in Hermetically Sealed Electric Vehicle Relays," *SAE Int. J. Passeng. Cars - Electron. Electr. Syst.*, vol. 11, no. 3, pp. 149–157, Apr. 2018, doi: 10.4271/2018-01-0765.
- [40] G.-F. Yu, Y.-J. Chiu, X. Zheng, Z.-L. Yuan, and Z.-X. Wang, "Contact pressure of high-voltage DC power relay change and life prediction and structure optimization," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 2, p. 1687814021991666, Feb. 2021, doi: 10.1177/1687814021991666.
- [41] S.-H. Kim, S.-H. Park, Y.-G. Kim, and C. Na, "EV-relay performance analysis of reverse surge protection devices," in *2015 3rd International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST)*, Oct. 2015, pp. 418–421. doi: 10.1109/ICEPE-ST.2015.7368442.
- [42] H. Chang-Kyu, Y. Seon-Woong, L. Kyung-Ho, and J. Hun, "A study on thermal behaviour prediction for automotive electric relay based on CFD," in *2018 24rd International Work-*

- shop on *Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*, Sep. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/THERMINIC.2018.8592875.
- [43] "Types of Relays Report (Documento Interno)." 2016.
- [44] "Global market share of electric vehicles 2050," *Statista*. <https://www.statista.com/statistics/1202364/ev-global-market-share/> (accessed Nov. 29, 2021).
- [45] X. Pang, Z. Li, M.-L. Tseng, K. Liu, K. Tan, and H. Li, "Electric Vehicle Relay Lifetime Prediction Model Using the Improving Fireworks Algorithm–Grey Neural Network Model," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2020, doi: 10.3390/app10061940.
- [46] "Automotive Relay Market Size | Global Forecast Report 2024," *Global Market Insights, Inc.* <https://www.gminsights.com/industry-analysis/automotive-relay-market> (accessed Nov. 29, 2021).
- [47] P. Jacob, "Failure mechanisms and precautions in plug connectors and relays," *Microelectron. Reliab.*, vol. 64, pp. 693–698, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.microrel.2016.07.030.
- [48] Y. Zhao, E. Zio, and G. Fu, "Remaining storage life prediction for an electromagnetic relay by a particle filtering-based method," *Microelectron. Reliab.*, vol. 79, pp. 221–230, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.microrel.2017.03.026.
- [49] C. H. Hsieh, C. S. Tsai, T. Y. Tseng, Y. S. Wong, and S. Z. Zhou, "Automated Visual Inspection of Contact Gap and Contact Malposition of Automotive Relay," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 190–191, pp. 661–665, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.190-191.661.
- [50] A. Liuti, F. R. Vedugo, N. Paone, and C. Ungaro, "Monitoring techniques for high accuracy interference fit assembly processes," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1740, no. 1, p. 060005, Jun. 2016, doi: 10.1063/1.4952677.
- [51] J. Zhong, J. Shi, and J. C. F. Wu, "Design of DOE-Based Automatic Process Controller With Consideration of Model and Observation Uncertainties," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 266–273, Apr. 2010, doi: 10.1109/TASE.2009.2013198.
- [52] R. Roy, S. Hinduja, and R. Teti, "Recent advances in engineering design optimisation: Challenges and future trends," *CIRP Ann.*, vol. 57, no. 2, pp. 697–715, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.007.
- [53] A. Liuti, F. Rodriguez Vedugo, N. Paone, and C. Ungaro, "High-accuracy interference-fit assembly utilizing a hybrid actuator," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 95, no. 1, pp. 747–758, Mar. 2018, doi: 10.1007/s00170-017-1256-3.
- [54] X. Wang, Z. Lou, X. Wang, and C. Xu, "A new analytical method for press-fit curve prediction of interference fitting parts," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 250, pp. 16–24, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.06.022.
- [55] X. Wang, Z. Lou, X. Wang, X. Hao, and Y. Wang, "Prediction of stress distribution in press-fit process of interference fit with a new theoretical model," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 233, no. 8, pp. 2834–2846, Apr. 2019, doi: 10.1177/0954406218799783.
- [56] T. N. Chakherlou and M. Ajri, "Strain ratcheting and stress relaxation around interference-fitted single-holed plates under cyclic loading: experimental and numerical investigations," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 36, no. 4, pp. 327–339, 2013, doi: 10.1111/ffe.12003.
- [57] E. Abdollahi, T. N. Chakherlou, and R. H. Oskouei, "Ratcheting Behaviour of Stainless Steel 316L with Interference Fitted Holes in Low-Cycle Fatigue Region," *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 70, no. 5, pp. 1349–1358, Jul. 2017, doi: 10.1007/s12666-016-0931-7.

- [58] C. Han and J. Zhang, "Interference Assembly and Fretting Wear Analysis of Hollow Shaft," *Sci. World J.*, vol. 2014, p. e919518, May 2014, doi: 10.1155/2014/919518.
- [59] T. N. Chakherlou, M. Mirzajanzadeh, and K. H. Saeedi, "Fatigue crack growth and life prediction of a single interference fitted holed plate," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 33, no. 10, pp. 633–644, 2010, doi: 10.1111/j.1460-2695.2010.01476.x.
- [60] B. You, Z. Lou, Y. Luo, Y. Xu, and X. Wang, "Prediction of Pressing Quality for Press-Fit Assembly Based on Press-Fit Curve and Maximum Press-Mounting Force," *Int. J. Aerosp. Eng.*, vol. 2015, p. e823019, Jul. 2015, doi: 10.1155/2015/823019.
- [61] N. L. Pedersen, "On optimization of interference fit assembly," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 54, no. 2, pp. 349–359, Aug. 2016, doi: 10.1007/s00158-016-1419-0.
- [62] K. Subramanian and E. P. Morse, "Assembly Analysis of Interference Fits in Elastic Materials," in *Precision Assembly Technologies and Systems*, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 41–49. doi: 10.1007/978-3-642-11598-1_5.
- [63] L. Bottini and A. Boschetto, "Interference fit of material extrusion parts," *Addit. Manuf.*, vol. 25, pp. 335–346, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2018.11.025.
- [64] "Prediction of Press-Fit Quality via Data Mining Techniques and Artificial Intelligence." <https://ieeexplore.ieee.org/document/8888164> (accessed Nov. 29, 2021).
- [65] F. Salameh *et al.*, "Modeling the Luminance Degradation of OLEDs Using Design of Experiments," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 6, pp. 6548–6558, Nov. 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2929150.
- [66] V. L. Miguéis, A. Camanho, and J. Falcão e Cunha, "Customer attrition in retailing: An application of Multivariate Adaptive Regression Splines," *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 16, pp. 6225–6232, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.eswa.2013.05.069.
- [67] G. B. Berikol and G. Berikol, "Chapter 7 - Predictive models in precision medicine," in *Artificial Intelligence in Precision Health*, D. Barh, Ed. Academic Press, 2020, pp. 177–188. doi: 10.1016/B978-0-12-817133-2.00007-0.
- [68] E. D. Gennatas and J. H. Chen, "Chapter 1 - Artificial intelligence in medicine: past, present, and future," in *Artificial Intelligence in Medicine*, L. Xing, M. L. Giger, and J. K. Min, Eds. Academic Press, 2021, pp. 3–18. doi: 10.1016/B978-0-12-821259-2.00001-6.
- [69] X. Chen, L. Wang, S. Yang, and M. Yu, "Empirical Passive Intermodulation Multiphysics Modeling Using Design of Experiment Method," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 69, no. 12, pp. 9371–9373, Dec. 2020, doi: 10.1109/TIM.2020.3031839.
- [70] K. J. Gutzwiller and A. Chaudhary, "Machine-learning models, cost matrices, and conservation-based reduction of selected landscape classification errors," *Landsc. Ecol.*, vol. 35, no. 2, pp. 249–255, Feb. 2020, doi: 10.1007/s10980-020-00969-y.
- [71] C. Hametner, M. Stadlbauer, M. Deregnacourt, S. Jakubek, and T. Winsel, "Optimal experiment design based on local model networks and multilayer perceptron networks," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 26, no. 1, pp. 251–261, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.engappai.2012.05.016.
- [72] C. Fan, M. Chen, R. Tang, and J. Wang, "A novel deep generative modeling-based data augmentation strategy for improving short-term building energy predictions," *Build. Simul.*, vol. 15, no. 2, pp. 197–211, Feb. 2022, doi: 10.1007/s12273-021-0807-6.
- [73] W. Lyu, B. Yuan, S. Liu, J. E. Simon, and Q. Wu, "Assessment of lemon juice adulteration by targeted screening using LC-UV-MS and untargeted screening using UHPLC-

- QTOF/MS with machine learning," *Food Chem.*, vol. 373, p. 131424, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131424.
- [74] D. Thirumalaikumarasamy, V. Balasubramanian, and S. Sree Sabari, "Prediction and optimization of process variables to maximize the Young's modulus of plasma sprayed alumina coatings on AZ31B magnesium alloy," *J. Magnes. Alloys*, vol. 5, no. 1, pp. 133–145, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.jma.2017.02.002.
- [75] Y. Ji, Y. Tian, M. Ahnfelt, and L. Sui, "Design and optimization of a chromatographic purification process for *Streptococcus pneumoniae* serotype 23F capsular polysaccharide by a Design of Experiments approach," *J. Chromatogr. A*, vol. 1348, pp. 137–149, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.chroma.2014.04.096.
- [76] M. Szczepanski, D. Malec, P. Maussion, and P. Manfé, "Design of Experiments Predictive Models as a Tool for Lifespan Prediction and Comparison for Enameled Wires Used in Low-Voltage Inverter-Fed Motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 3, pp. 3100–3113, May 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2970855.
- [77] A. Jankovic, G. Chaudhary, and F. Goia, "Designing the design of experiments (DOE) – An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems," *Energy Build.*, vol. 250, p. 111298, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111298.
- [78] S. Beg, S. Swain, M. Rahman, M. S. Hasnain, and S. S. Imam, "Chapter 3 - Application of Design of Experiments (DoE) in Pharmaceutical Product and Process Optimization," in *Pharmaceutical Quality by Design*, S. Beg and M. S. Hasnain, Eds. Academic Press, 2019, pp. 43–64. doi: 10.1016/B978-0-12-815799-2.00003-4.
- [79] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments, 10th Edition*, 10th edition. Wiley, 2019.
- [80] F. Liu, Y. Shi, and L. Najjar, "Application of Design of Experiment Method for Sports Results Prediction," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 122, pp. 720–726, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.11.429.
- [81] D. C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control, 8th Edition*, 8th edition. Wiley, 2019.
- [82] N. Lahoud, J. Faucher, D. Malec, and P. Maussion, "Electrical Aging of the Insulation of Low-Voltage Machines: Model Definition and Test With the Design of Experiments," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 9, pp. 4147–4155, Sep. 2013, doi: 10.1109/TIE.2013.2245615.
- [83] B. P. Wang, Z. X. Han, L. Xu, and T. Reinikainen, "A novel response surface method for design optimization of electronic packages," in *EuroSimE 2005. Proceedings of the 6th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, 2005.*, Apr. 2005, pp. 175–181. doi: 10.1109/ESIME.2005.1502795.
- [84] N. Lahoud, M. Q. Nguyen, P. Maussion, D. Malec, and D. Mary, "Lifetime model of the inverter-fed motors secondary insulation by using a design of experiments," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 6, pp. 3170–3176, Dec. 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.005202.
- [85] T. Mandic, B. K. J. C. Nauwelaers, and A. Baric, "Simple and Scalable Methodology for Equivalent Circuit Modeling of IC Packages," *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 303–315, Feb. 2014, doi: 10.1109/TCPMT.2013.2274820.

- [86] M. Riquez, A. Roussy, J. Blue, L. Bucelle, J. Pinaton, and J. Pasquet, "Key Effects and Process Parameters Extraction on the CD of Reactive Ion Etching (RIE) Based on DOE Modeling," *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 30, no. 4, pp. 539–546, Nov. 2017, doi: 10.1109/TSM.2017.2758020.
- [87] M. Tavares Luiz *et al.*, "Design of experiments (DoE) to develop and to optimize nanoparticles as drug delivery systems," *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, vol. 165, pp. 127–148, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.ejpb.2021.05.011.
- [88] V. Cipolla, K. Abu Salem, G. Palaia, V. Binante, and D. Zanetti, "A DoE-based approach for the implementation of structural surrogate models in the early stage design of box-wing aircraft," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 117, p. 106968, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.ast.2021.106968.
- [89] A. S. Lynn, B. D. Tanner, C. A. Ryan, D. P. O'Malley, and E. S. Moore, "A comparison between predictive modelling approaches for spirally reinforced composite catheter tubing using Classical Statistical DOE and a Custom DOE Design," *Procedia Manuf.*, vol. 51, pp. 967–974, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.136.
- [90] "TE Connectivity Évora (Documento interno)." 2020.
- [91] "Capability Study for Processes and Machines (Documento interno)." 2019.
- [92] "EVC 250 Main Contactor," *TE Connectivity*. <https://www.te.com/usa-en/products/relays-contactors-switches/contactors/automotive-contactors/evc-250-main-contactor-evc-250.html> (accessed Nov. 30, 2021).
- [93] "White Paper: EVC 250 Main Contactor," *TE Connectivity*. <https://www.te.com/usa-en/industries/hybrid-electric-mobility/insights/evc-250-main-contactor.html> (accessed Nov. 29, 2021).
- [94] H. Ding, R. Ibrahim, K. Cheng, and S.-J. Chen, "Experimental study on machinability improvement of hardened tool steel using two dimensional vibration-assisted micro-end-milling," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 50, no. 12, pp. 1115–1118, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2010.08.010.
- [95] M. Tejedor, J. A. García, J. Carrizo, L. Elbaile, and J. D. Santos, "Effect of the residual stresses on surface coercive force in amorphous alloys," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 215–216, pp. 319–321, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0304-8853(00)00146-3.
- [96] J. Moulin, F. Mazaleyrat, A. Mendez, and E. Dufour-Gergam, "Internal stress influence on the coercivity of FeCuNbSiB thin films," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 322, no. 9, pp. 1275–1278, May 2010, doi: 10.1016/j.jmmm.2009.06.043.
- [97] O. I. Aksenov, A. A. Fuks, and A. S. Aronin, "The effect of stress distribution in the bulk of a microwire on the magnetization processes," *J. Alloys Compd.*, vol. 836, p. 155472, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.155472.
- [98] Ş. Kasman, "Impact of parameters on the process response: A Taguchi orthogonal analysis for laser engraving," *Measurement*, vol. 46, no. 8, pp. 2577–2584, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.measurement.2013.04.022.
- [99] International Organization for Standardization, "ISO 7870-2:2013," *ISO*. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/04/01/40174.html> (accessed Nov. 29, 2021).
- [100] D. Vélez, A. Ayuso, C. Perales-González, and J. T. Rodríguez, "Churn and Net Promoter Score forecasting for business decision-making through a new stepwise regression

- methodology," *Knowl.-Based Syst.*, vol. 196, p. 105762, May 2020, doi: 10.1016/j.knosys.2020.105762.
- [101]B. Żogała-Siudem and S. Jaroszewicz, "Fast stepwise regression based on multidimensional indexes," *Inf. Sci.*, vol. 549, pp. 288–309, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ins.2020.11.031.
- [102]R. Godina and J. C. O. Matias, "Statistical Process Control Accuracy Estimation of a Stamping Process in Automotive Industry," in *Innovations Induced by Research in Technical Systems*, Cham, 2020, pp. 48–60. doi: 10.1007/978-3-030-37566-9_5.
- [103]J. H. Kim and I. Choi, "Choosing the Level of Significance: A Decision-theoretic Approach," *Abacus*, vol. 57, no. 1, pp. 27–71, 2021, doi: 10.1111/abac.12172.

APÊNDICE A - REVESTIMENTO DE SUPERFÍCIE

No sentido de averiguar a eventual influência do revestimento das peças no processo em si, é realizado um estudo acerca da dureza associada ao revestimento de superfície de cada peça. Pretende-se apurar se um eventual revestimento com elevada dureza afeta a força necessária para os processos. É utilizado um equipamento de medição de dureza e, através de um diamante que perfura as peças durante um determinado intervalo de tempo, são calculados os valores de dureza. Estes, podem ser obtidos com diversas forças de pressão do diamante, que variam de material para material, como se pode observar nas tabelas A.1 e A.2. Se o diamante não produzir uma estrutura suficientemente perceptível, não é possível determinar a dureza. É necessário ajustar a força e calcular a dureza de novo.

No entanto, uma vez que estes controlos não são realizados na presente organização, não existe informação necessária para realizar estes cálculos com a devida precisão. Não só não existe uma especificação que aconselhe a força a utilizar (o que pode influenciar o facto de o diamante perfurar apenas o revestimento ou perfurar a superfície original da peça), como não existe a especificação de dureza atribuída a cada um destes tipos de material. Outra limitação advém do facto de, mesmo quando existem, estas especificações tendem a ser amplas, o que dificultaria a interpretação.

Em suma, ao analisar os dados das tabelas A.1 e A.2, não é encontrado nenhum tipo de relação especial entre os valores obtidos pelos modelos ou pela respetiva validação (no caso do EVC 250) e estes valores, pelo que, apesar de tudo indicar que estes revestimentos não afetam o processo, torna-se uma análise inconclusiva, dadas as limitações.

Tabela A.1 - Medição de dureza (HV) dos revestimentos de superfície (Produto EVC 175)

		Processo P06		Processo P01/02	
		<i>Core</i>	<i>Plate</i>	<i>Bushing</i>	<i>Frame</i>
Material da Peça		1.1015 St. DIN 17405 – Rfe60 (125 HV)			
Material e Dimensão do Revestimento		3-5 μm de Níquel sobre 1-3 μm de Cobre (total de 4-8 μm)	3-6 μm de Cobre	15-20 μm de Umicore Mirralloy 3849 (CuSn10)	3-8 μm de Cobre
Medições de Dureza (HV) e respectiva força utilizada	0,3 kg	-	125,2	-	87,8
	0,5 kg	-	120,4	145,6	77,3
	1 kg	123,8	105,3	133,8	81,9

Tabela A.2 - Medição de dureza (HV) dos revestimentos de superfície (Produto EVC 250)

		Processo P06		Processo P01/02	
		<i>Core</i>	<i>Plate</i>	<i>Bushing</i>	<i>Frame</i>
Material da Peça		1.1015 St. DIN 17405 – Rfe60 (125 HV)			
Material e Dimensão do Revestimento		3-6 μm de Níquel sobre 1-3 μm de Cobre (total de 4-9 μm)	5-15 μm de Zinco	16-20 μm de Umicore Mirralloy 3849 (CuSn10)	5-15 μm de Zinco
Medições de Dureza (HV) e respectiva força utilizada	0,3 kg	-	-	-	-
	0,5 kg	170,5	96	271,8	-
	1 kg	-	87	286,3	110,3

| B

APÊNDICE B - DESENHOS

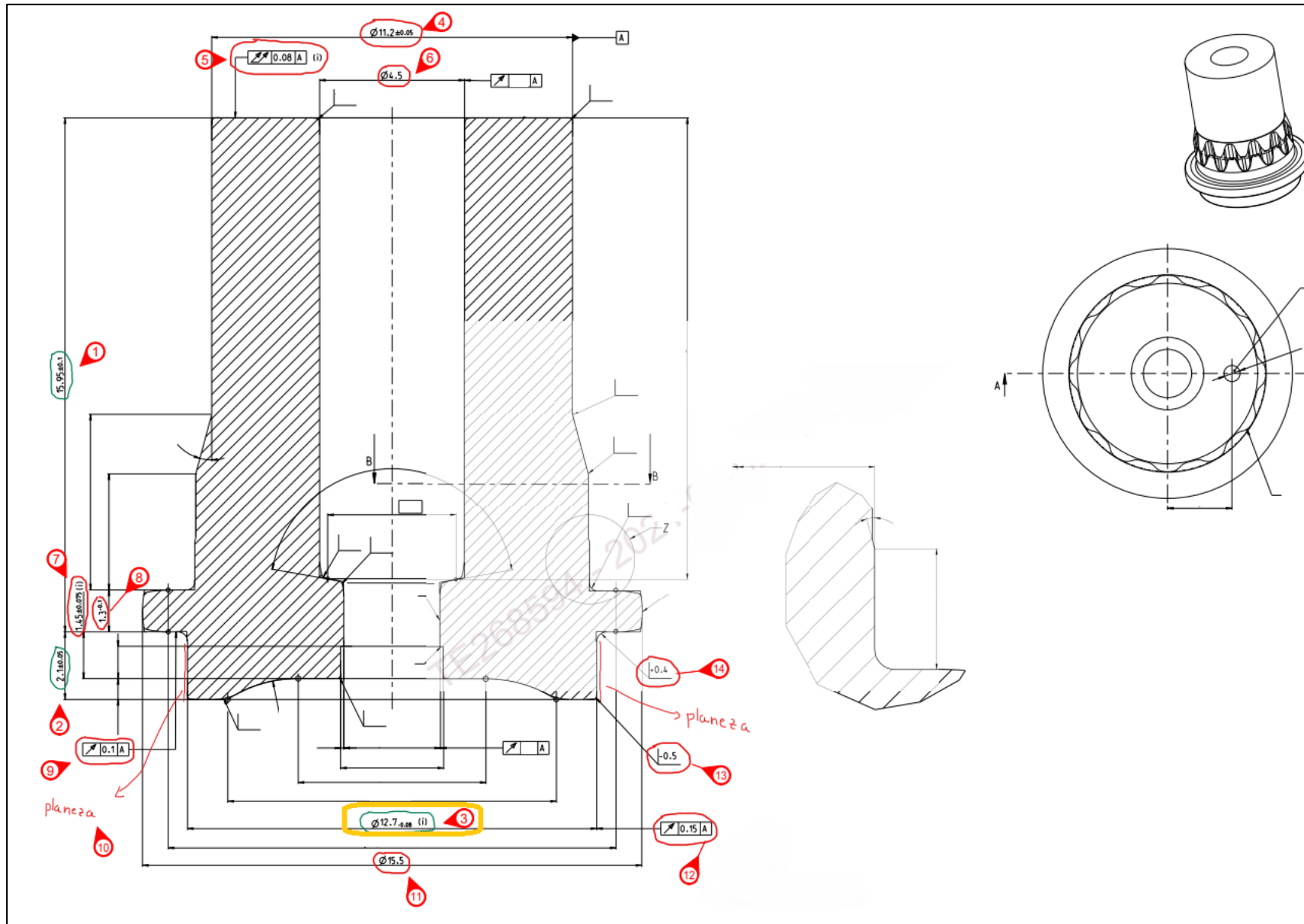


Figura B.1 - Desenho do Componente Core

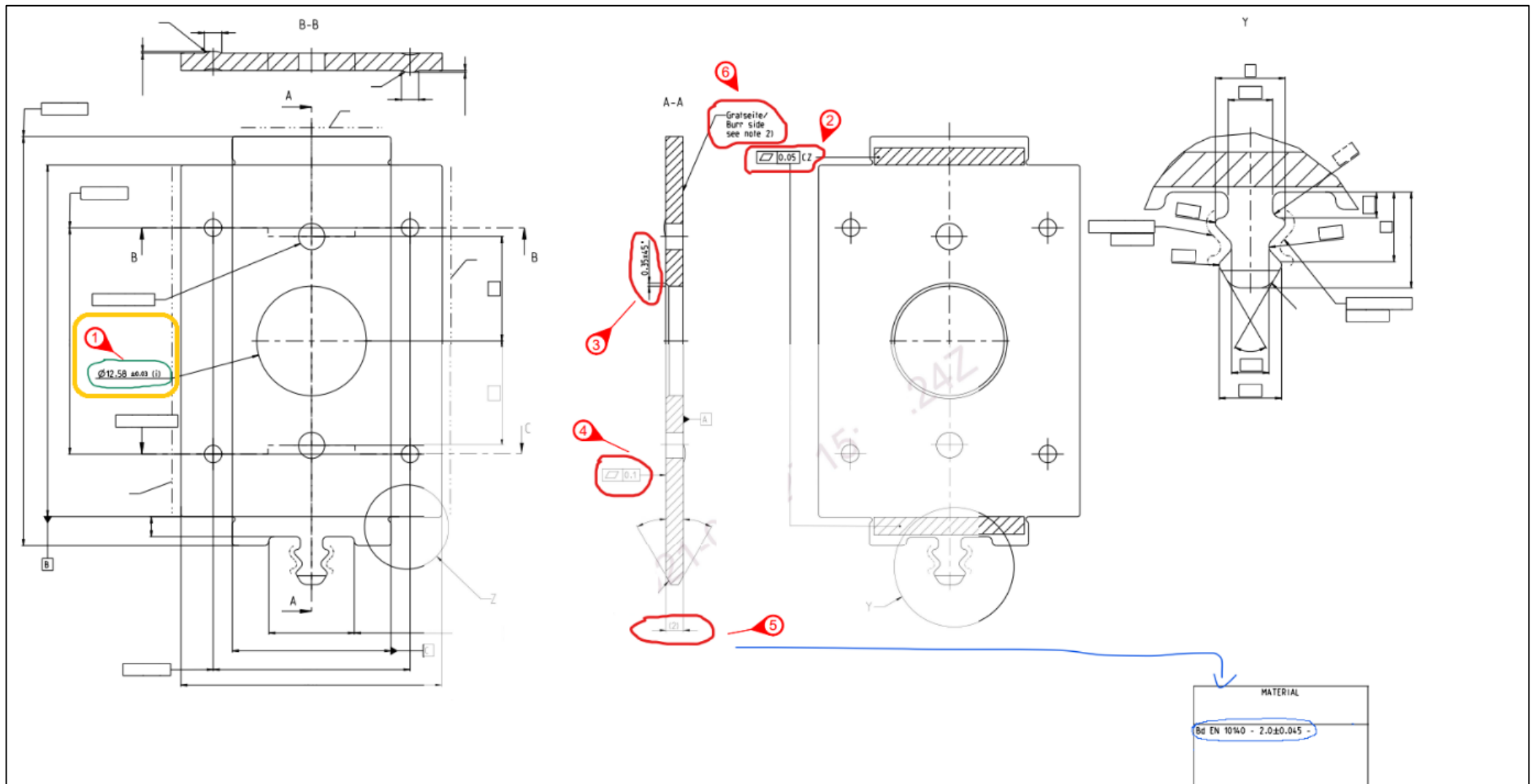


Figura B.2 - Desenho do Componente *Plate*

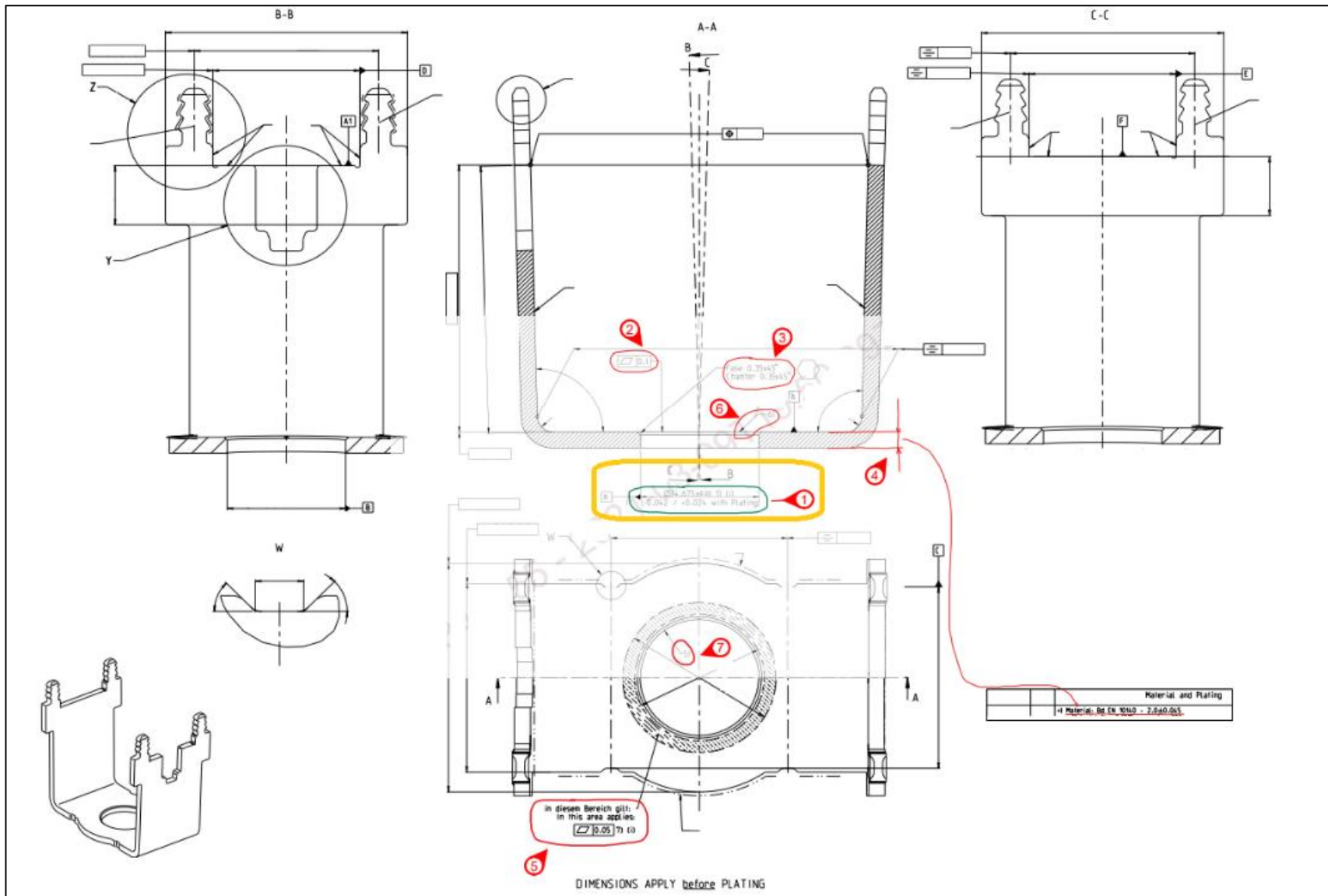


Figura B.3 - Desenho do Componente *Frame*

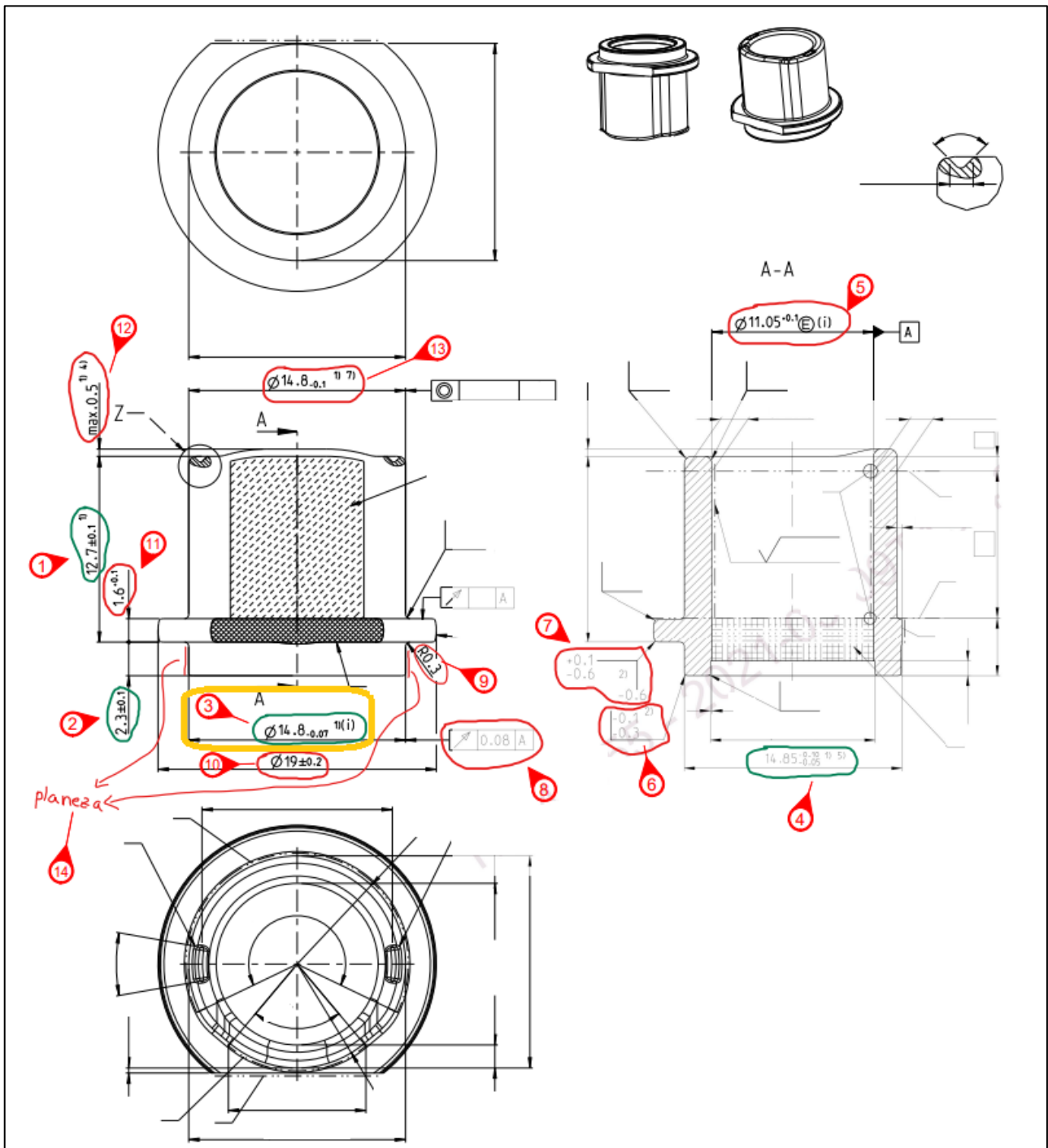


Figura B.4 - Desenho do Componente *Bushing*

APÊNDICE C - CARACTERIZAÇÃO DOS LOTES

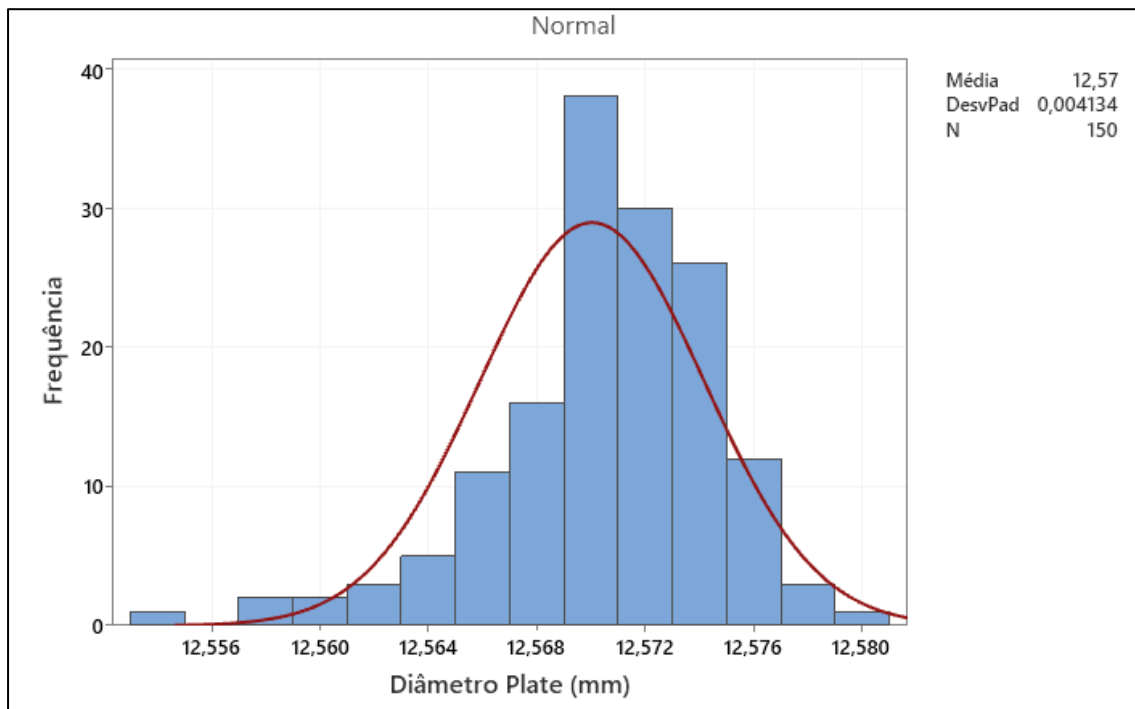


Figura C.1 - Histograma de Diâmetro do furo da *Plate* (mm), com ajuste à distribuição normal

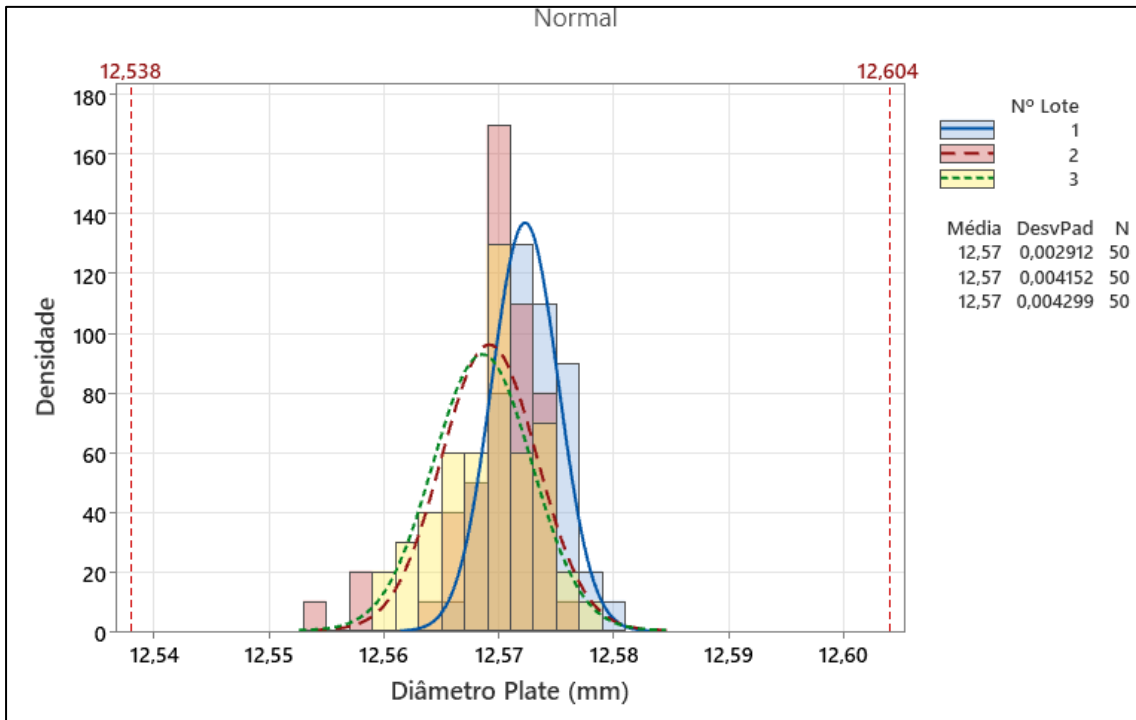


Figura C.2 - Histograma de Diâmetro do furo da *Plate* (mm), com ajuste e com agrupamento pela variável categórica correspondente ao nº do lote

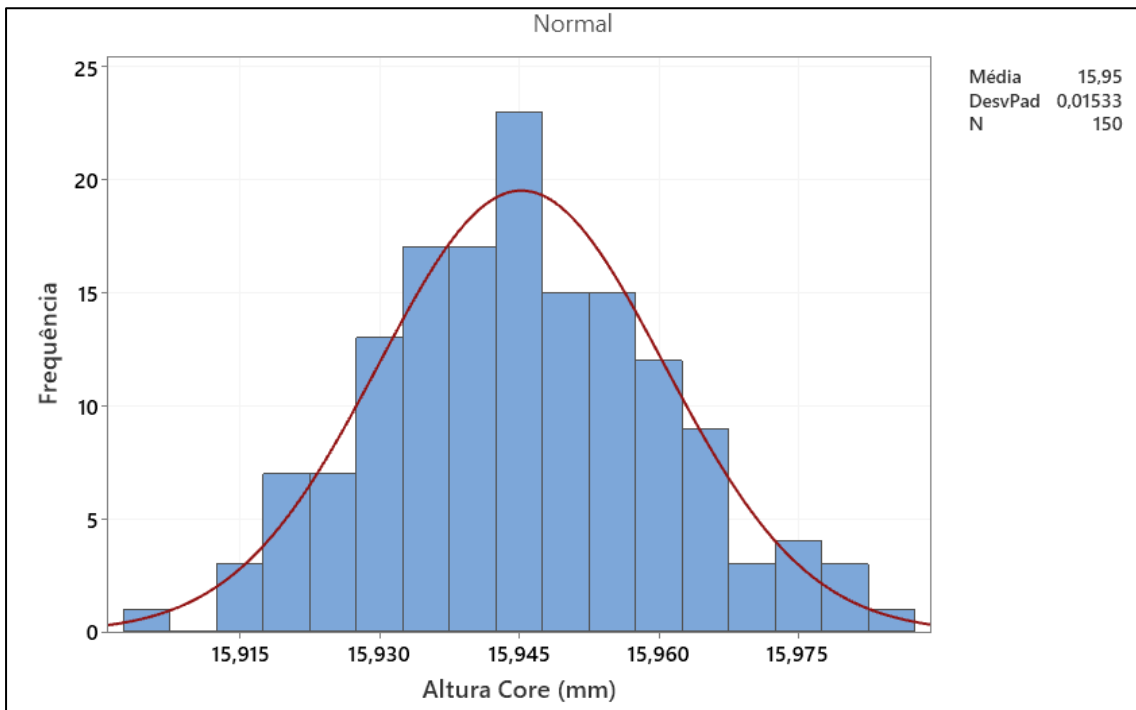


Figura C.3 - Histograma de Altura *Core* (mm), com ajuste à distribuição normal

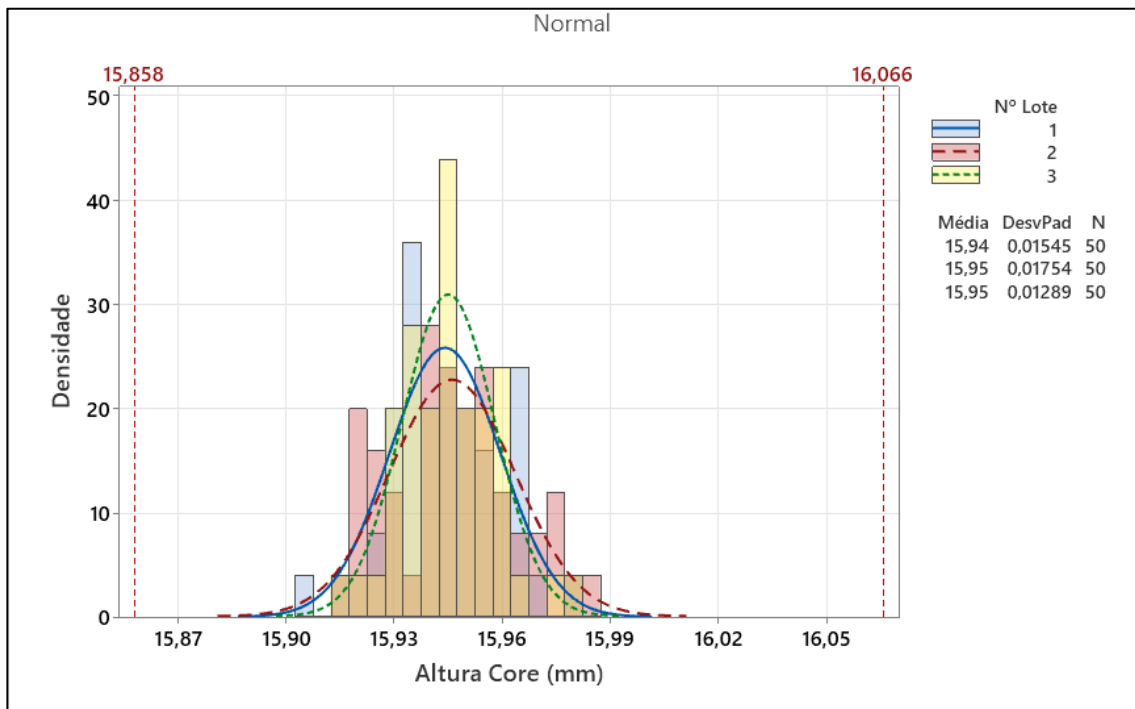


Figura C.4 - Histograma de Altura *Core* (mm), com ajuste e com agrupamento pela variável categórica correspondente ao nº do lote

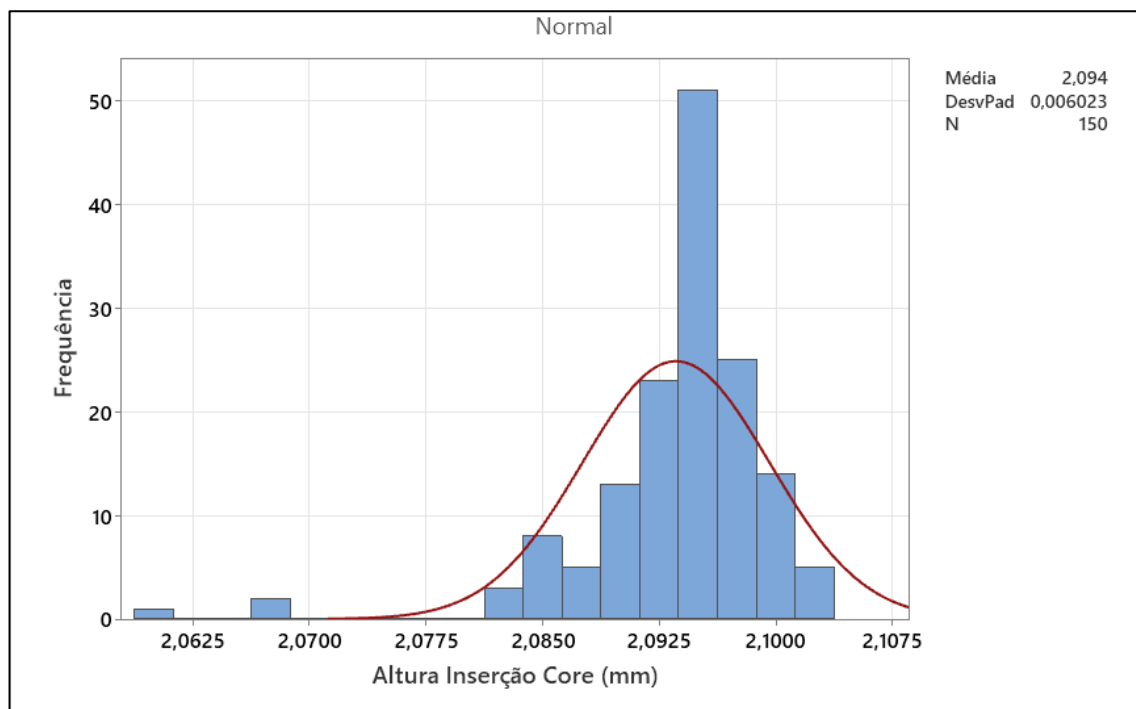


Figura C.5 - Histograma de Altura Inserção *Core* (mm), com ajuste à distribuição normal

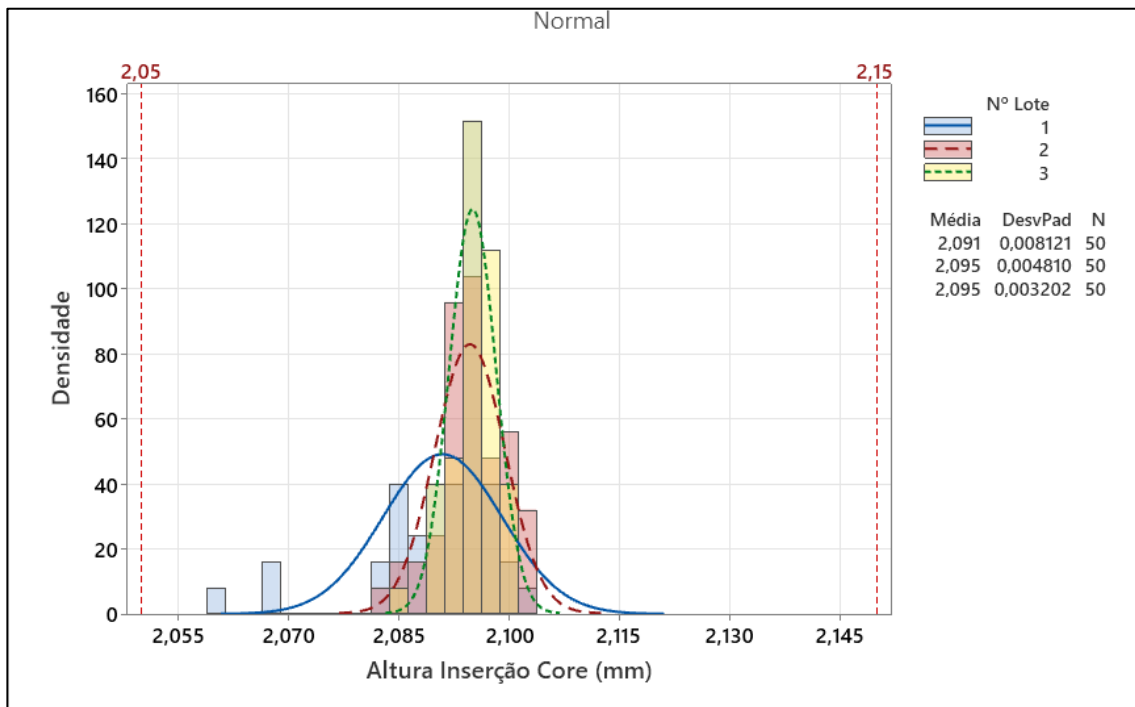


Figura C.6 - Histograma de Altura Inserção *Core* (mm), com ajuste e com agrupamento pela variável categórica correspondente ao nº do lote

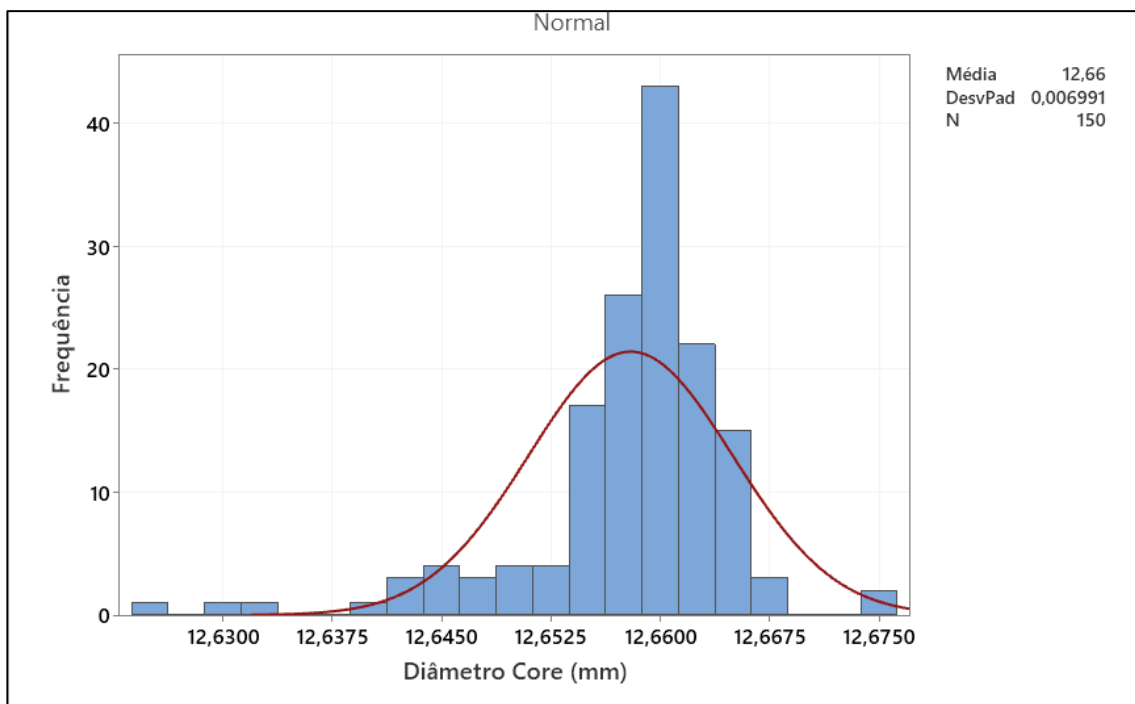


Figura C.7 - Histograma de Diâmetro *Core* (mm), com ajuste à distribuição normal

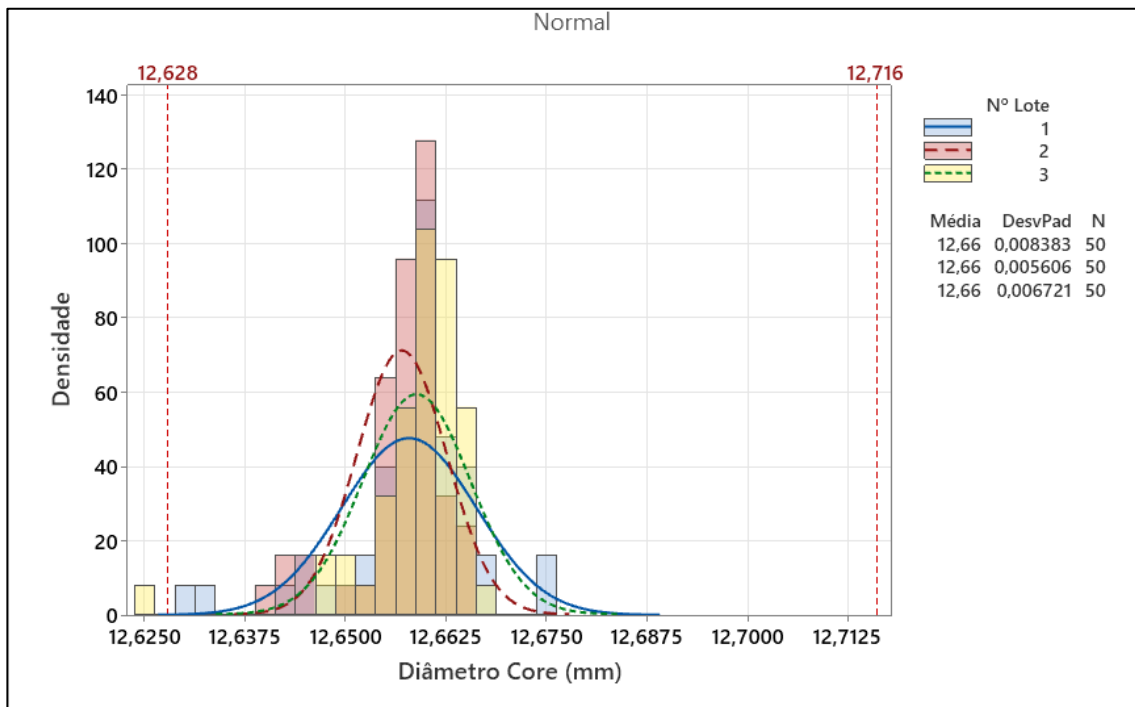


Figura C.8 - Histograma de Diâmetro *Core* (mm), com ajuste e com agrupamento pela variável categórica correspondente ao nº do lote

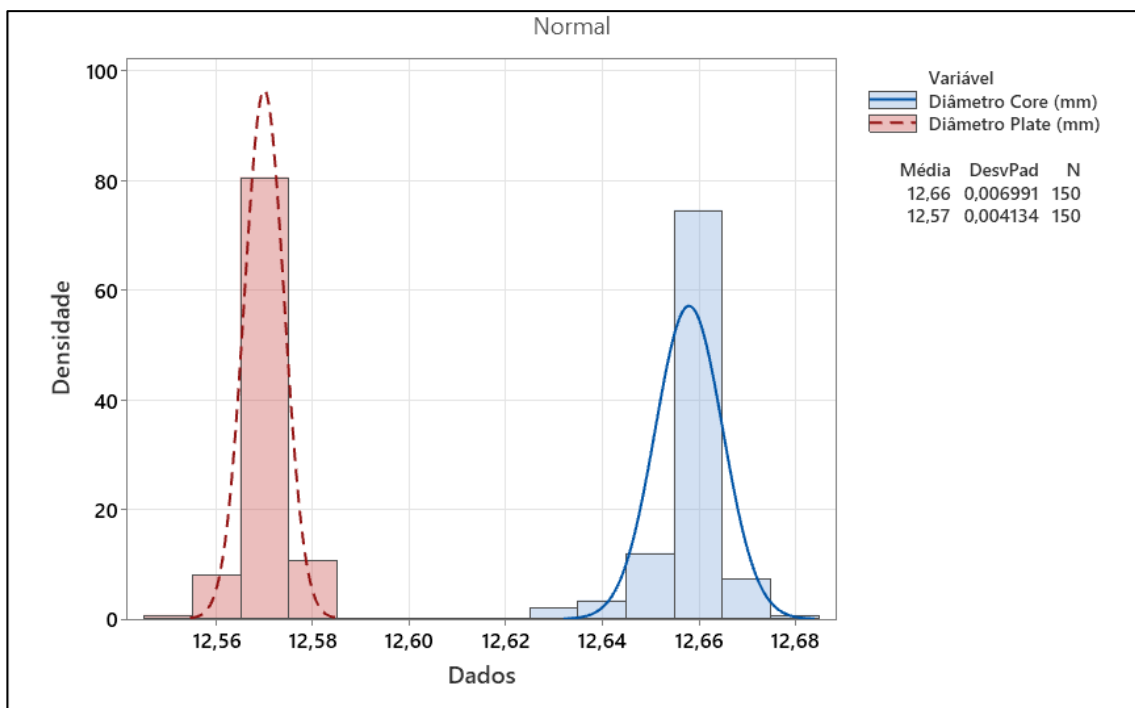


Figura C.9 - Histogramas de interferência entre Diâmetro *Core* (mm) e Diâmetro do furo da *Plate* (mm)

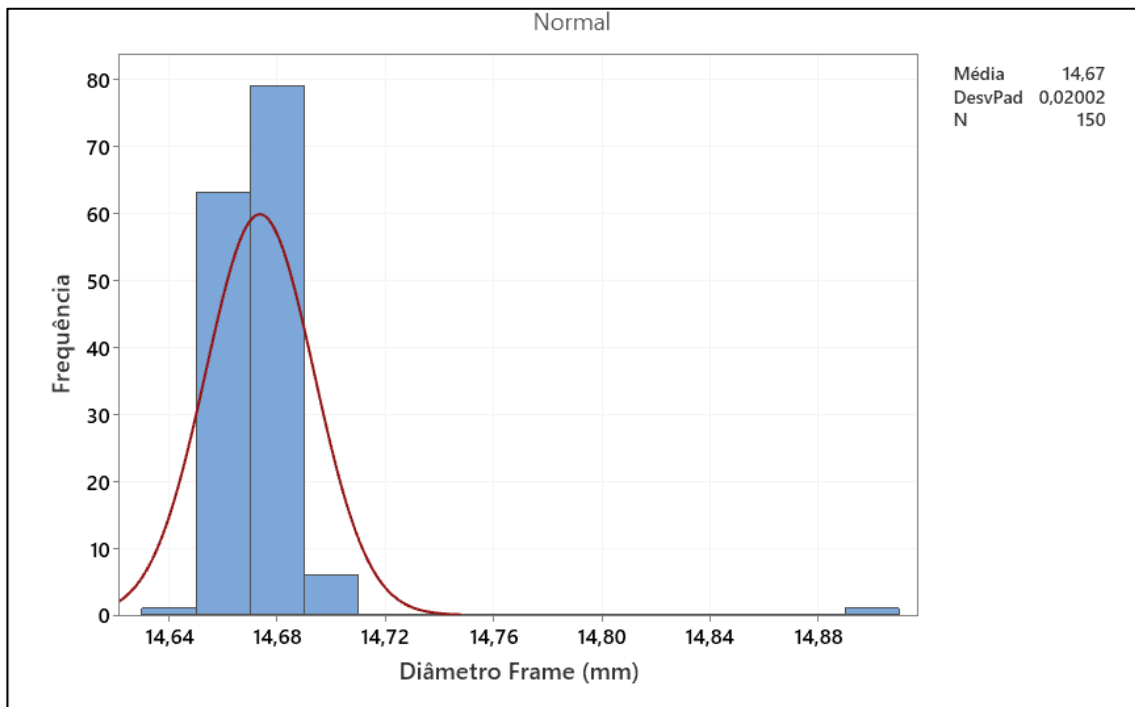


Figura C.10 - Histograma de Diâmetro *Frame* (mm), com ajuste à distribuição normal

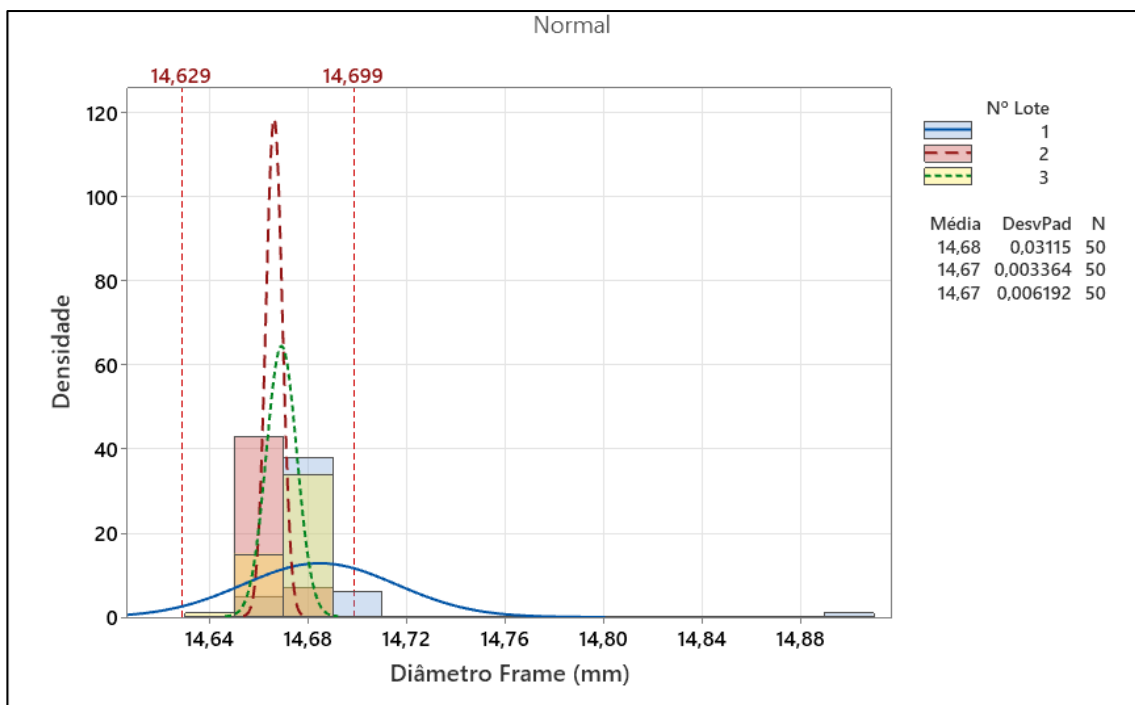


Figura C.11 - Histograma de Diâmetro *Frame* (mm), com ajuste e com agrupamento pela variável categórica correspondente ao nº do lote

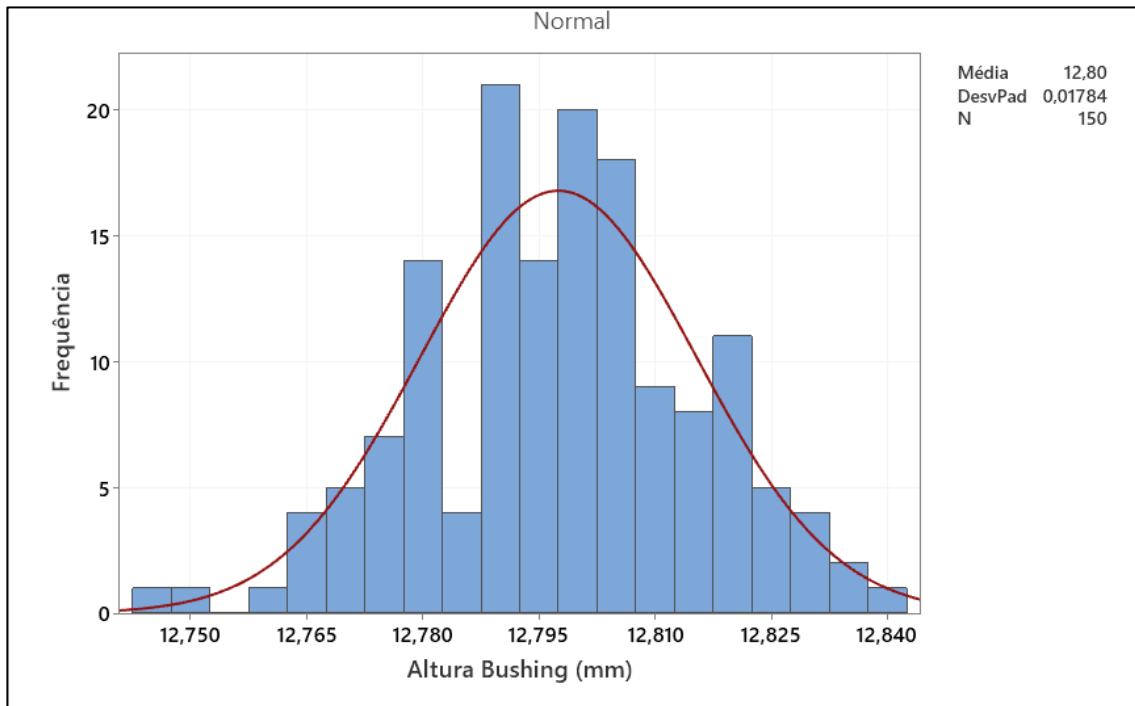


Figura C.12 - Histograma de *Altura Bushing* (mm), com ajuste à distribuição normal

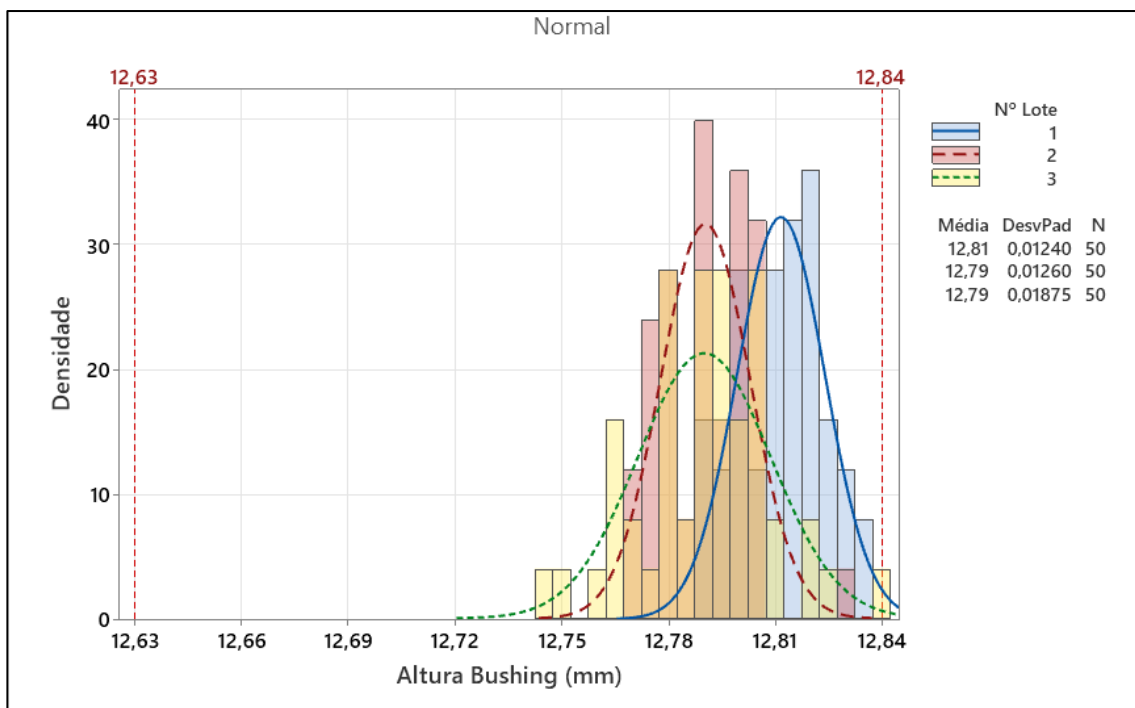


Figura C.13 - Histograma de *Altura Bushing* (mm), com ajuste e com agrupamento pela variável categórica correspondente ao nº do lote

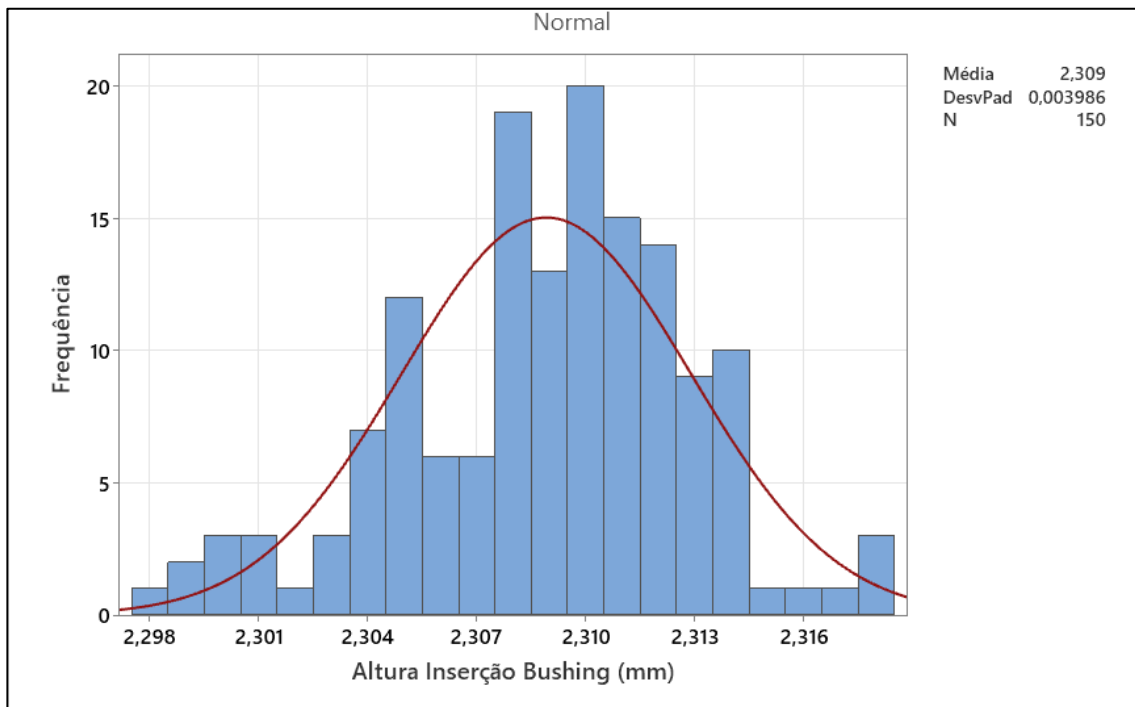


Figura C.14 - Histograma de Altura Inserção *Bushing* (mm), com ajuste à distribuição normal

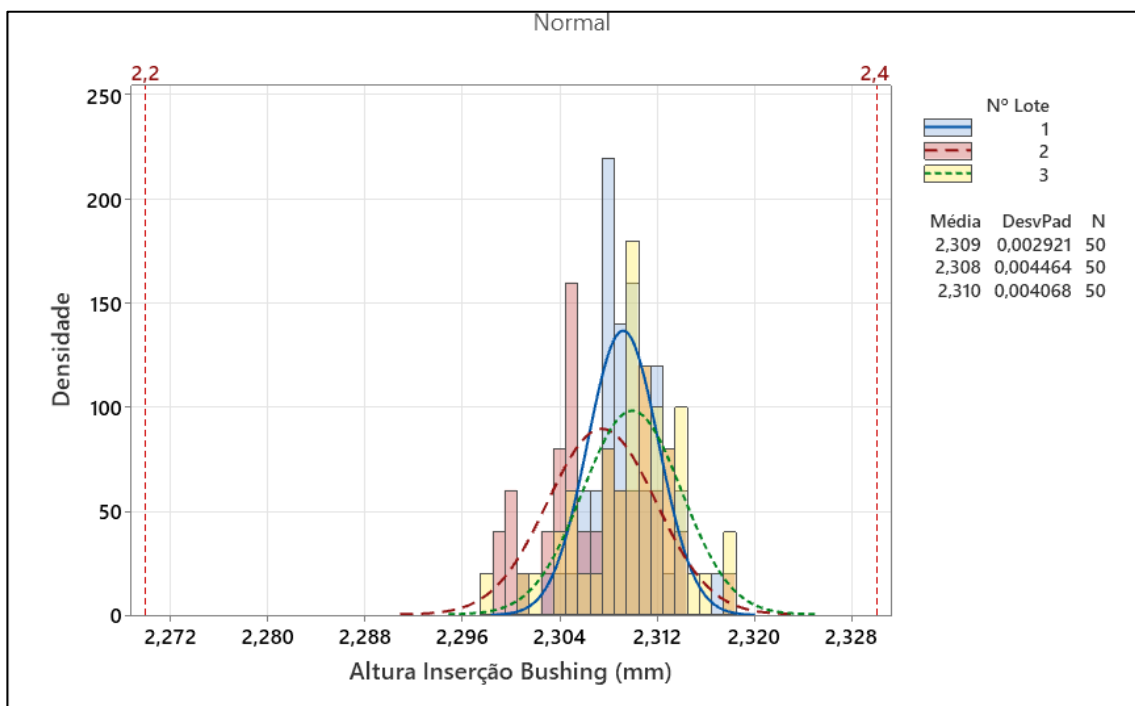


Figura C.15 - Histograma de Altura Inserção *Bushing* (mm), com ajuste e com agrupamento pela variável categórica correspondente ao nº do lote

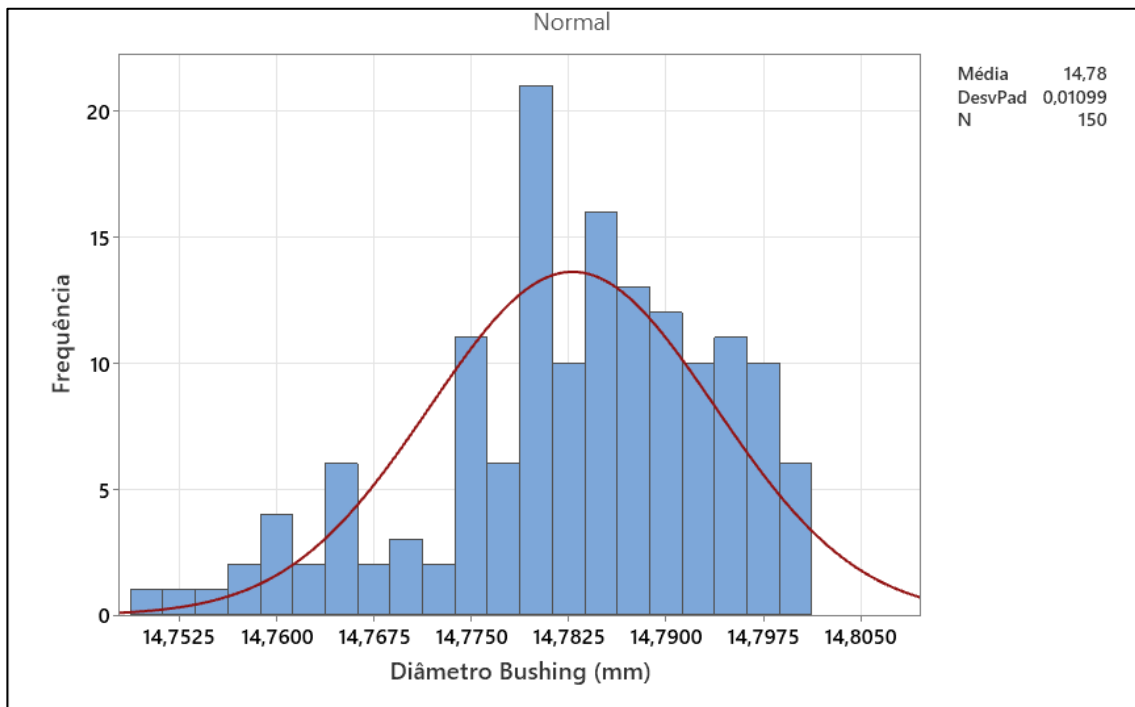


Figura C.16 - Histograma de Diâmetro *Bushing* (mm), com ajuste à distribuição normal

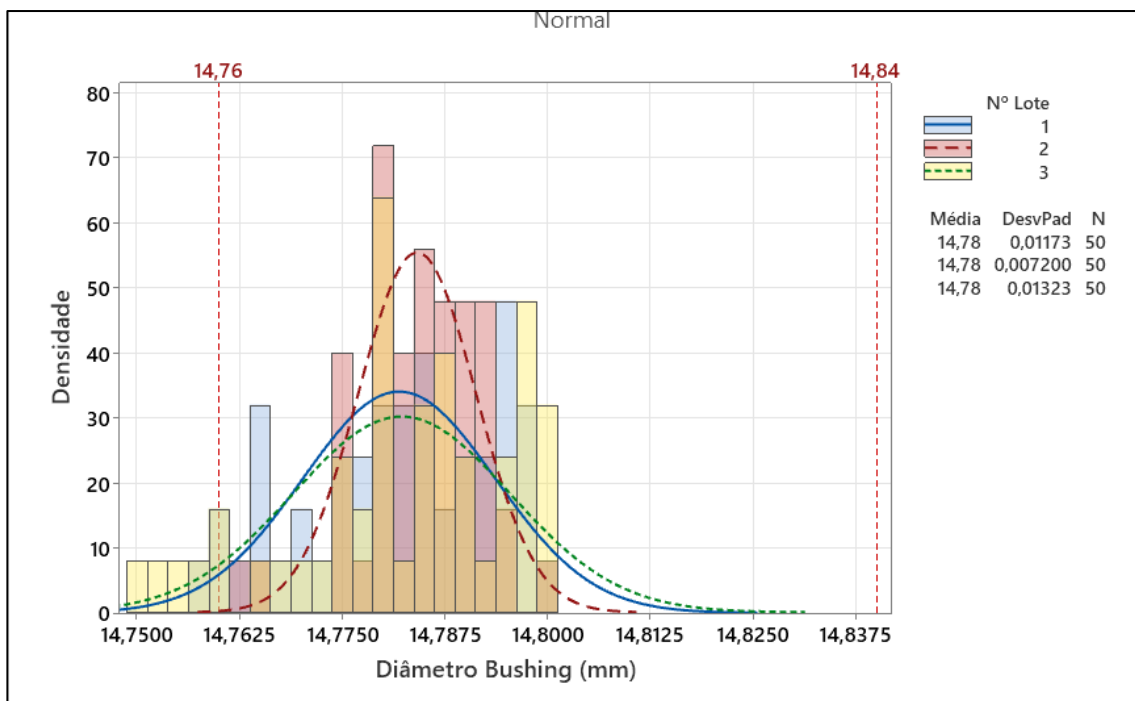


Figura C.17 - Histograma de Diâmetro *Bushing* (mm), com ajuste e com agrupamento pela variável categórica correspondente ao nº do lote

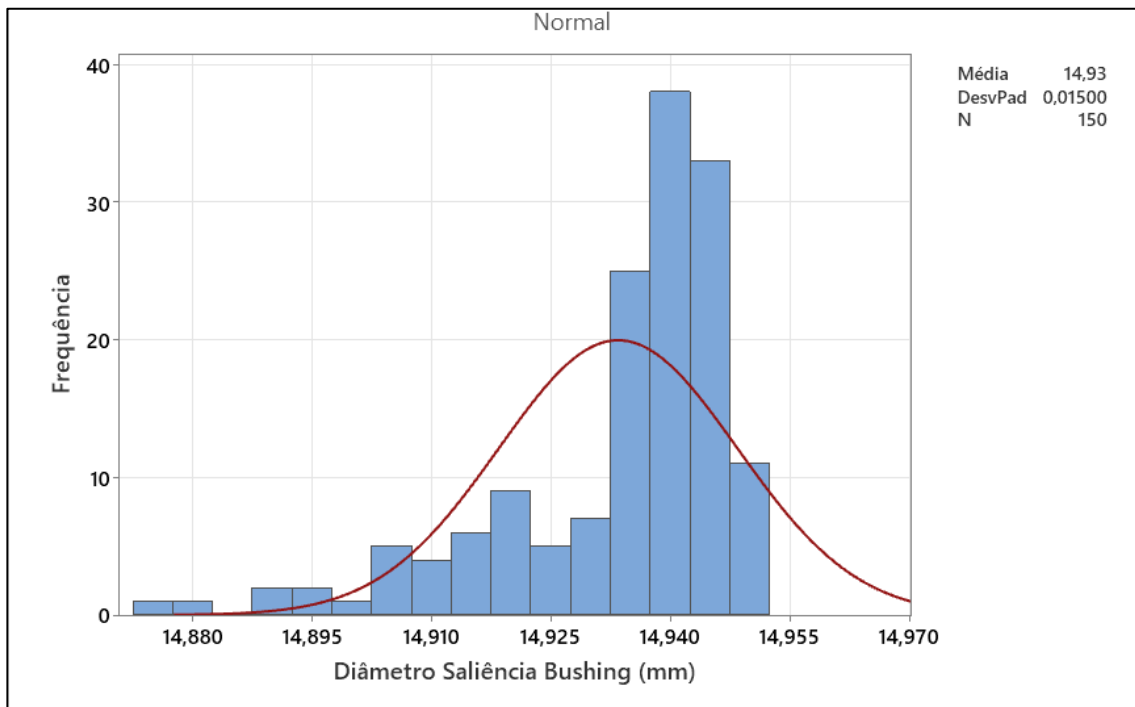


Figura C.18 - Histograma de Diâmetro Saliência *Bushing* (mm), com ajuste à distribuição normal

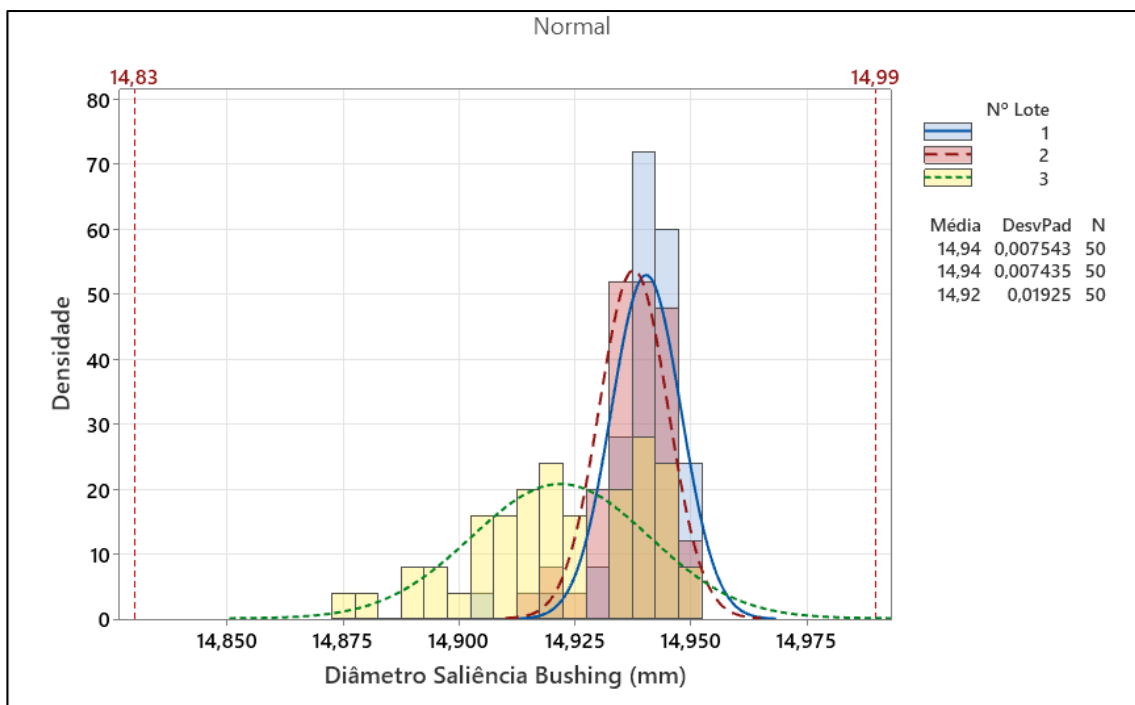


Figura C.19 - Histograma de Diâmetro Saliência *Bushing* (mm), com ajuste e com agrupamento pela variável categórica correspondente ao nº do lote

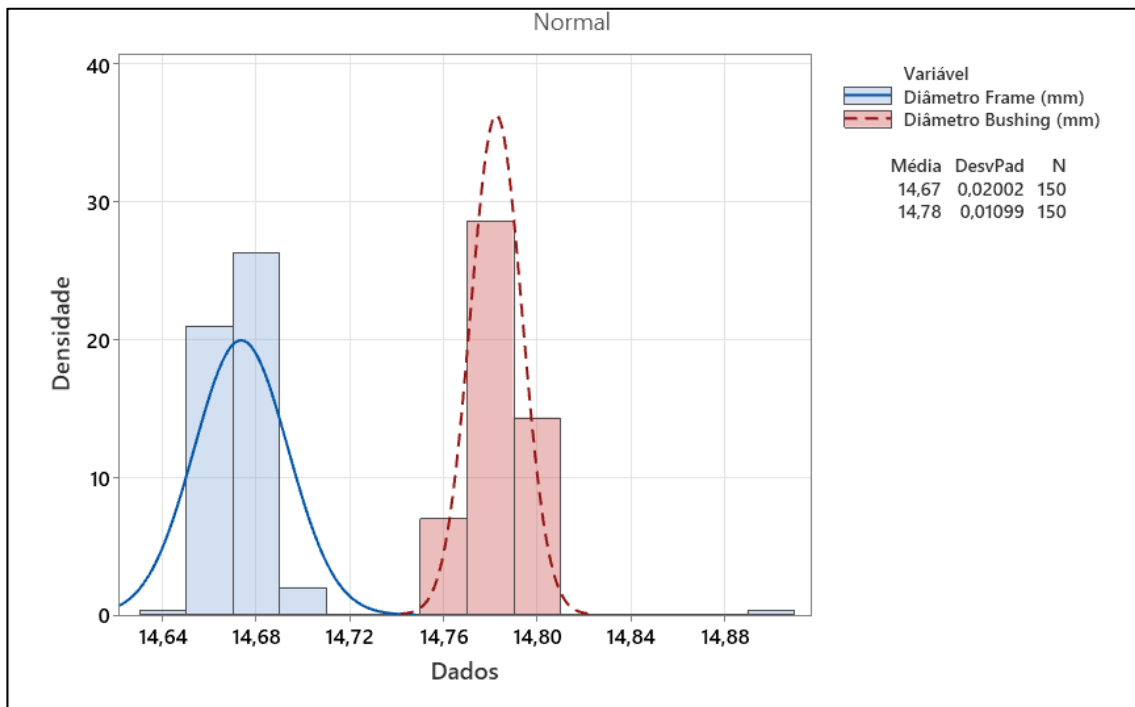


Figura C.20 - Histogramas de interferência entre Diâmetro *Frame* (mm) e Diâmetro *Bushing* (mm)



2022

JOÃO MARQUEZ

PREVISÃO E PADRONIZAÇÃO DE PROCESSOS DE *PRESS-FIT* EM CONTADORES ATRAVÉS DE DESE-
NHO DE EXPERIÊNCIAS APLICADO A UMA UNIDADE INDUSTRIAL DA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL