



**Pedro Miguel Craveiro Casaleiro**

Licenciado em Ciências de Engenharia e Gestão industrial

**Análise Estatística de um Processo de Fabrico  
com Dois Fornecedores e respetiva Estabilização  
de Geometria Singular  
- Caso de Estudo -**

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

Orientadora: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela Matos,  
Professora Auxiliar,  
Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Professora Doutora Ana Paula Ferreira Barroso  
Arguente: Professora Doutora Carla Maria Moreira Machado  
Vogal: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2019



## **Análise Estatística de um Processo de Fabrico com Dois Fornecedores e respetiva Estabilização de Geometria Singular - Caso de Estudo**

Copyright © Pedro Miguel Craveiro Casaleiro, 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.



*Dedico este trabalho à minha família e aos meus amigos...*

*E a umas quantas Estrelas do Céu*



## AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer a toda a minha família que acreditou que isto era possível. Aos meus pais que sempre fizeram os possíveis e impossíveis para permitir que todo este trabalho fosse realizado  $\approx$  24 anos.

Um agradecimento especial à minha irmã, que fez o favor de informatizar todos os esquemas apresentados neste caso de estudo, entendendo e realizando na perfeição tudo o que lhe foi pedido.

Aos meus amigos que sempre que é preciso, aparecem para trazer um sorriso bom, criando constantemente aquela força interna que nos faz continuar a trabalhar todos os dias para sermos melhores.

Ao SuperMário que me introduziu e dedicou tanta hora no *LaTeX*. Ao Padeira que colocou um olhar crítico sobre a escrita. Ao *Machadinho*, que esteve lado a lado comigo nos finalmentes infidáveis.

Aos meus colegas de faculdade, mais novos ou mais velhos, que sempre fizeram com que todo o tempo passado na faculdade, a caminho da faculdade, na volta da faculdade, fosse mais fácil e tivesse um carinho especial ao fim de cada dia.

À empresa onde este estudo foi realizado, que me recebeu de braços abertos, permitindo conhecer todos os meandros do sistema, sem qualquer resistência. Ao *Engenheiro Jorge Valente*, que me recebeu primeiramente. Aos Engenheiros de Processo com os quais foram passadas muitas horas de trabalho. E por fim, à "*Ti Filipa*" e à *Leonor* (Eng<sup>a</sup>. Qualidade e *Patroa*), que me acompanharam no dia-a-dia na empresa. Elas tinham sempre a capacidade de tornar o ambiente de trabalho num ambiente sério, profissional e acima de tudo, divertido.

Por fim, mas não menos importante, pelo contrário até, um agradecimento muito especial à *Professora Ana Sofia*, que aceitou ser minha orientadora. Desde o primeiro dia até ao último, teve sempre atenção, cuidado e um acompanhamento incondicional, apesar da vida atarefada que leva.

Um Muito Obrigado a Todos.



## RESUMO

---

O tema abordado é derivado do ramo automóvel, o caso de estudo presente abordou a produção de barras de tejadilho quanto à sua geometria.

A questão envolvida na necessidade do estudo, remete-nos para um problema envolvente do paradigma fabril, a produção *Just in Time (JIT)* e a matéria-prima.

A produção *JIT* implica que todos os processos reduzam stocks, convergindo num ritmo de produção certo, que não possui margem para erros e exige uma disponibilidade de matérias-primas e qualidade de serviço elevada.

O alumínio é a matéria-prima utilizada nas barras de tejadilho, tem capacidades muito apreciadas na indústria automóvel. Toda a produção gira em torno do tratamento térmico, que altera as suas características.

A necessidade surge porque existe uma incompatibilidade destes dois pontos, o *JIT* que corre contra o tempo e o alumínio que precisa do tempo de tratamento ideal.

A produção física de barras de tejadilho, especificamente, envolve três atividades: a dobragem dos perfís, o tratamento térmico e a maquinação dos mesmos. São processos que dependem de um grande número de variáveis, mas principalmente da condição da matéria-prima referida.

O estudo presente requerido pela entidade, envolveu a geometria final das barras e uma abordagem que a tentasse resolver ou, pelo menos, compreendê-la melhor. Deste modo, desenvolveu-se um estudo de 5 meses, decorridos de Fevereiro a Junho do presente ano, onde os três primeiros foram parte da integração no ambiente fabril com os respectivos processos e para a concepção do teste - que tentou abranger o maior número de questões possíveis, já os últimos dois meses espelharam a realização do teste e a análise de resultados.

O estudo recaiu sobre a geometria final do produto. Deste modo, procurou-se analisar algumas características e processos envolventes.

A característica do material deveria ser medida por meio de ensaios de tracção.

No processo de dobragem, sendo um dos processos fulcrais, usou-se uma metodologia que garantisse sempre a mesma forma de estar por parte da máquina a fim de encontrar respostas sobre o processo e a reação da matéria-prima ao mesmo. Operou-se por meio do sistema de medição da fábrica - constituídos por um gabarito de dobragem e um relógio comparador.

---

O Termo endurecimento, é a atividade intermédia, trata de aplicar o envelhecimento acelerado por meio de um forno e temperaturas elevadas, capacitando o alumínio a desenvolver as suas funções à posteriori.

A maquinação, é o último processo e ilustra a geometria final como resultado do aspecto do produto final. A análise destes resultados foi executada por meio do sistema de medição, que tem por objetivo, simular a viatura. O sistema de medição consiste num gabarito de maquinação e num relógio comparador.

Os dados recolhidos são alvo de análises de variâncias para refletir o comportamento do material. Existiu ainda lugar para analisar um processo visual, a pintura, realizada e analisada do mesmo modo que a maquinação. Foi desenvolvida devido ao facto de ser uma atividade que poderia comprometer a geometria.

Todos estes pontos reduzem-se a dois fatores, o tratamento térmico e as características do alumínio.

Devido a estes pontos, foi possível realizar medições em todas as fases do processo, atividade após atividade, concluindo, deste modo, que as características e a condição do material são os pontos a ter em consideração.

**Palavras-chave:** Análise de Variância, Alumínio, Barras de Tejadilho, Dobra por Extensão, Controlo Estatístico do Processo.

---

## ABSTRACT

---

The subject of this dissertation derived from automotive sector, and the case study in question regarded the production of roof bars in terms of its geometry.

This study focuses on the paradigm in factories, the *Just In Time* production and raw materials.

The *JIT* production forces all processes to reduce stocks, merging into the right production rhythm, that does not have any error margins and demands high availability of raw materials and services.

Aluminum is the raw material used in the roof bars, which has features that are very appreciated in the automotive industry and all the production swirls around its heat treatment, which change features.

The need for this study exists because there is an incompatibility between the rushing caused by *JIT* and the time needed to get ideal features to be used.

The physical production of roof bars, specifically, involves three activities: the bending of the profiles, the heat treatment and the milling. All of these depend on a great number of variables, but the most significant is the condition of the raw material.

The present study ordered by the entity, involved the final geometry of the bars and an approach that tried to fix or, at least, understand it better. This way, a study was developed for 5 months, from February to June of the present year, where the three first months were focus on the factory, engaging in the industrial process and the conception of the test – which tried to involve the maximum number of variables. In the last two months of this study, the tests were made as well as the analyses of the results.

The study concerned on the final geometry of the product. Thereby, it was necessary to observe some features of the industrial processes.

The features should be measured by traction tests.

In the bending process, it was used a methodology that could guarantee the uniformity of the process. The operation was conducted with the factory measuring system – composed by a bending template and a dial gauge.

The aging treatment is the intermediate activity, it uses an oven and high temperatures to accelerate the aging rate of the aluminium to assure that the specimen gets the characteristics of an old one.

The milling is the last process and it illustrates the final look on the product. The

---

analysis of these results was executed using a measuring system that simulates the vehicle. This system consists on the bending template and the dial gauge. The data gathered is analyzed in terms of its variance to reflect on the materials's behavior.

All production is reduced to the heat treatment and the features of aluminium.

Due to this, was possible to measure all the phases in the processes, activity after activity and conclude that the features and the condition of the aluminium is the most important one.

**Keywords:** Anova, Aluminium, Roof Bars, Stretch Bending, Statistical Process Control.

---

# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e Âmbito . . . . .	1
1.2 Objetivo . . . . .	1
1.3 Metodologia . . . . .	2
1.4 Estrutura da Dissertação . . . . .	2
<b>2 Fundamentos Teóricos</b>	<b>5</b>
2.1 Estatística . . . . .	5
2.1.1 Amostras, População, Coleção e Análise de Dados . . . . .	5
2.1.2 Variáveis Discretas e Contínuas - Distribuição Normal . . . . .	6
2.1.3 Distribuição F-Fisher . . . . .	7
2.2 Qualidade - Metrologia . . . . .	7
2.2.1 Diagrama de Causa-e-Efeito . . . . .	8
2.2.2 Sistema de Medição . . . . .	8
2.2.3 Repetibilidade e Reprodutibilidade - R&R . . . . .	13
2.3 Desenho de Experiências . . . . .	14
2.4 Análise de Variância - Anova . . . . .	14
2.4.1 Apresentação de Pressupostos . . . . .	14
2.4.2 1 fator, Vários Níveis - One Way Anova . . . . .	15
2.4.3 2 fatores, Vários Níveis - Two Way Anova . . . . .	16
2.5 Capacidade do Processo . . . . .	16
<b>3 Estudo de Caso</b>	<b>19</b>
3.1 Estudo de Caso . . . . .	19
3.1.1 Empresa . . . . .	19
3.1.2 Material - Alumínio . . . . .	19
3.1.3 Processo Fabril . . . . .	20
3.1.4 Problema - Necessidade . . . . .	25
3.2 Metodologia . . . . .	27

<b>4</b>	<b>Apresentação de Resultados</b>	<b>33</b>
4.1	Capacidade do Processo - $C_p$ . . . . .	34
4.2	Dados Gerais - Teste . . . . .	34
4.3	Estudo R&R . . . . .	35
4.4	Análise Dureza . . . . .	36
4.5	Processo - Dobragem . . . . .	37
4.6	Processo - Termo Endurecimento . . . . .	43
4.7	Processo - Maquinação e Pintura . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>55</b>
5.1	Conclusões . . . . .	55
5.2	Trabalhos Futuros . . . . .	56
	<b>Bibliografia</b>	<b>59</b>
<b>I</b>	<b>Anexos</b>	<b>62</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Relógios Comparador - Padrão . . . . .	9
2.2	Gabarito da Dobragem - Ilustração do <i>Notch</i> . . . . .	10
2.3	Gabarito de Maquinação . . . . .	11
2.4	Sistema Macho-Fêmea . . . . .	12
2.5	Posição de Medição . . . . .	12
2.6	Medição - P8 . . . . .	12
2.7	Medição - P9 . . . . .	12
2.8	Medição - P9 . . . . .	12
3.1	Processo Fabril - Físico . . . . .	21
3.2	Máquina de Dobragem - Início e Fim do Curso . . . . .	22
3.3	Equipamento de Maquinação . . . . .	24
3.4	Processo Fabril - Real . . . . .	25
3.5	Planeamento Testes Dureza . . . . .	29
3.6	Planeamento Produção - Teste . . . . .	31
4.1	Resultados Esperados do Envelhecimento do Material . . . . .	33
4.2	Resultados Dureza - Pós Termo Endurecimento . . . . .	37
4.3	Perfil e Pontos Analizados . . . . .	39
4.4	Dobragem - Eixo Frontal - Fornecedor S . . . . .	39
4.5	Gráficos da Dobragem - Eixo Frontal - Fornecedor S . . . . .	41
4.6	Dobragem - Eixo Traseiro - Fornecedor N e S . . . . .	42
4.7	Dobragem - Pré e Pós Forno - Fornecedor S - Eixo Frontal e Traseiro . . . . .	44
4.8	Dobragem - Fornecedor N - Eixo Frontal, Eixo Traseiro . . . . .	45
4.9	Perfil e Pontos Analizados - Maquinação (representativo) . . . . .	46
4.10	Maquinação - Fornecedor S - Eixo Frontal e Traseiro . . . . .	47
4.11	Maquinação - Fornecedor N - Eixo Frontal e Traseiro . . . . .	49
4.12	Maquinação - Eixo Frontal - Comparação Fornecedores . . . . .	50
4.13	Maquinação - Pré e Pós Pintura - Fornecedor N . . . . .	52
I.1	Dados P14 - Recolha Cálculo CP . . . . .	62
I.2	<i>Statistica</i> - Percentagem da Variação Total- R&R - P3,P4, P6 . . . . .	63
I.3	<i>Statistica</i> - Percentagem da Variação Total- R&R - P14,P16, P17 . . . . .	64



## LISTA DE TABELAS

2.1	<i>Anova</i> . . . . .	15
4.1	Distribuição Amostras p/ Semana . . . . .	34
4.2	Gabarito Dobragem - Quadro Resumo Estudo $R\%R$ . . . . .	35
4.3	Gabarito Dobragem - Quadro Resumo Estudo $R\%R$ . . . . .	36





## INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento e Âmbito

A indústria automóvel mundial produziu cerca de 70498388 viaturas em 2018, movendo um valor económico considerável em seu redor. É uma área exigente ao nível da produção, a margem de desperdício é nula, a concorrência é elevada e o mercado é competitivo.

O presente caso provém de uma empresa que fabrica componentes automóveis, mais especificamente, barras de tejadilho. São um acessório longitudinal que tem como função receber uma estrutura cuja utilização possibilita o transporte de bicicletas ou bagageiras. Todo o seu processo é exigente e exige atenção devido ao facto de ser um acessório aco-plado à viatura que pode colocar em risco a segurança, tanto dos passageiros da própria viatura como de viaturas terceiras. Isto devido ao facto de que se as barras não possuírem as características necessárias poderão não resistir às forças realizadas durante uma viagem.

### 1.2 Objetivo

A área da qualidade da instituição fabril, estando alerta dos paradigmas atuais e de todos os avanços ao nível da melhoria contínua, considerou importante realizar um estudo mais aprofundado à produção. A necessidade intrínseca é referente ao controlo dimensional das barras de tejadilho longitudinais à saída do processo, que está baseado na existência de dois fornecedores de alumínio distintos e no comportamento do material durante a produção. O objetivo é encontrar uma solução viável para que a fábrica seja capaz de produzir uma geometria singular, baseada nos dois fornecedores utilizando um único processo de fabrico, sendo que não é o atual processo.

Sendo o primeiro estudo desta natureza realizado na empresa, visou-se clarificar algumas noções existentes na realidade fabril. Definiu-se uma série de objetivos paralelos,

capazes de completar o estudo e auxiliar na resolução do objetivo principal.

Considerou-se pertinente a abordagem ao processo e avaliação da capacidade de produção. Assim, por um lado, a análise a ambos os fornecedores de matérias em relação ao tempo e por outro lado, de ambas em relação ao tempo. Averiguou-se deste modo, como a variabilidade apresentada pelos fornecedores projeta respostas capazes de afetar o processo de fabrico.

Outro ponto de interesse seria a abordagem à característica de tratamento térmico com que o material é apresentado na fábrica, refletindo assim o estado. Este ponto foi testado por meio de medições de dureza.

A dobragem é o primeiro processo da cadeia, capaz de comprometer o sistema, função que lhe confere atenções delicadas. Deste modo, requeri testes e análises à dobragem, ao comportamento pós dobragem e à dobragem pós tratamento térmico. Importa referir que todas estes testes são válidos para ambos os fornecedores ao longo do processo.

Para concluir os objetivos complementares, analisou-se o último processo, a maquinação, que produz a geometria final. Requer atenção devido à necessidade de produção dentro dos limites de especificação exigidos pelo cliente final, o ponto a referir é a variabilidade do processo apresentada por cada um dos alumínios que se produz neste projeto.

### **1.3 Metodologia**

A metodologia abordada neste estudo foi desenvolvida por meio de trabalho de campo, e passou por avaliar a prestação do material ao longo do processo e do tempo. O processo assume quatro atividades - a avaliação da dureza, a dobragem, o termo-endurecimento e a maquinação do material.

Deste modo, a metodologia é constituída por um teste a um contentor de extrusão de cada um dos fornecedores, de onde foi recolhida a amostra que foi processada de semana em semana ao longo de 1 mês. Após a realização de cada uma das atividades que integram o processo, existiu a recolha de dados referentes às geometrias respetivas.

As medições colhidas foram organizadas e informatizadas por forma a poderem ser tratadas, com o auxílio de ferramentas como capacidade do processo, a análise de variância e um programa de computador tornaram todo o teste viável. Avaliou-se assim toda a linha fabril, o desempenho e a relação que existe entre processos. Concluindo, espera-se que o teste seja completo e capaz de cobrir todas as áreas susceptíveis de dúvidas e questões por parte da empresa e que no fim seja possível melhorar o processo e corresponder ao objetivo.

### **1.4 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos devidamente estruturados. De um modo geral, os três primeiros capítulos são referentes à introdução, iniciando com

a abordagem do estudo, fazendo referência a componentes teóricas úteis e terminando a área introdutória com a realidade do problema, as necessidades da empresa e a metodologia aplicada como resolução de problemas. Os dois últimos capítulos incidiram sobre toda a reflexão aos resultados das medições efetuadas, as discussões oportunas e as conclusões devidamente acompanhadas de pesquisas futuras.

O primeiro capítulo explica os motivos do caso de estudo, os objetivos que tentaram ser alcançados e a primeira introdução à abordagem que vai ser praticada ao longo do documento.

Seguem-se o segundo e o terceiro capítulos, alusivos à 'Revisão de Literatura', necessária a uma dissertação e que permitirá colher algumas noções importantes. Sendo o segundo mais técnico, no que diz respeito a ferramentas que serão utilizadas para compreender todo o processo fabril e todos os dados resultantes do mesmo, abrangendo temas da área da *Estatística Descritiva*, da *Metrologia*, da *Capacidade do Processo* e do *Desenho de Experiências*. O terceiro capítulo, mais específico, representa todo o trabalho experimental, onde se reflete a necessidade da unidade fabril, a explicação dos materiais, do processo e ainda do raciocínio inerente à metodologia desenvolvida e aplicada.

Os dois últimos capítulos darão o mote para o término do caso de estudo. O quarto capítulo será constituído por toda a apresentação de resultados e devida discussão dos mesmos. Por último, no quinto capítulo apresentam-se as conclusões retiradas da discussão e abordará possíveis investigações ou estudos futuros.



## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A presente dissertação enquadra-se na área da qualidade e o trabalho desenvolvido baseia-se num âmbito técnico e exato, a Estatística, abordada no presente capítulo. Aliado a esta vertente do tema, existe toda a atmosfera envolvente da origem do estudo, que exige a sua compreensão para devida interpretação dos dados e da respetiva problemática, a qual será apresentada no capítulo 3.

### 2.1 Estatística

A estatística é um dos mais importantes ramos do conhecimento. Possui uma série de ferramentas que permitem recolher, explorar, descrever e interpretar dados numéricos. Habitualmente, o estudo estatístico raramente alcança a 'interpretação' propriamente dita sendo que o processo para o qual se utilizou todas essas ferramentas, habitualmente prático, não necessita da parte teórica explicativa tão aprofundada. Quando se verifica esta premissa como no presente caso de estudo, a estatística é considerada uma metodologia e não uma teoria. É de notar que a estatística é um método quantitativo, ou seja, a sua ligação base é numérica, sendo ainda um fragmento da matemática aplicada respondendo naturalmente sobre um rigor exato e baseia-se em noções, princípios e premissas bem determinados [Murteira, 1993].

#### 2.1.1 Amostras, População, Coleção e Análise de Dados

Existem duas correntes distintas entre o que é *Análise Exploratória de Dados - AED* e *Estatística Descritiva*. Peters(1987) defende que a AED é parte da estatística descritiva, Mallows(1983) afirma pouco ortodoxo identificar 'exploração' e 'descrição'. Utilizaremos neste estudo uma terceira abordagem, apresentada por Lehman(1988) cuja ideia afirma que a análise de dados possui dois objetivos fundamentais, o primeiro que procura aspetos

de interesse nos dados e um segundo que organiza os mesmos dados para reflectir padrões. Desta forma, Lehman sugere que o primeiro objetivo é respondido com base na AED e o segundo com a ajuda da estatística descritiva.

A *coleção de dados* pode ser considerada o primeiro estado da AED, ou seja, é o primeiro contacto com toda a estrutura que se está a estudar, designadamente a introdução à realidade que se apresenta perante quem executa a recolha. É um processo com pouca exigência e rigor, é somente para criar o primeiro contacto com os dados. A *amostra* é uma palavra que tem de ser delicadamente manobrada dentro da estatística, tem um conceito intrínseco forte e muito representativo. As amostras referem-se aos dados sejam eles recolhidos inicialmente, tratados ou referentes à amostra representativa de uma população. Daí a importância da referência a amostras estar acompanhada da devida identificação. A *população* em estatística representa um conjunto de dados que apresentam a mesma génese, as mesmas características e com possibilidade de estudo [Murteira, 1993].

### 2.1.2 Variáveis Discretas e Contínuas - Distribuição Normal

Variável é o que representa a resposta do objeto de estudo, habitualmente representado por  $x$ , e este valor pode ser de dois tipos, discreto ou contínuo. Denominam-se por variáveis discretas todas aquelas que só possuem valores finitos, por exemplo no lançamento de uma moeda ao ar, se o código estiver definido para representar por '1' quando sai cara e por '0' quando não sai cara, esta distribuição é discreta porque todos os lançamentos só podem tomar valores finitos, neste caso, '0' ou '1'. Por contraponto existem as variáveis contínuas que podem aparecer sobre a forma de qualquer valor dentro do domínio real, por exemplo a distribuição de alturas apresentada pelos alunos numa turma de ensino básico. Se existir uma medição de alturas encontraremos uma série de valores dentro do intervalo existente, onde provavelmente nem sequer existem duas alturas repetidas porque a distribuição é contínuas.

A *distribuição normal* insere-se no grupo das variáveis contínuas e é representada habitualmente por  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ . É comum ser apresentada no domínio da *Gestão da Qualidade* e distribuições de dados de produções, daí a sua importância para o caso de estudo. A Função de Densidade de Probabilidade de uma variável  $X$  normalmente distribuída dá-se por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.1)$$

onde  $\mu$  representa a média da população e  $\sigma$  representa o desvio padrão.

Existe ainda uma variante da família de expressões muito utilizada, a distribuição normal reduzida, a qual tem a particularidade de possuir  $\mu=0$  e  $\sigma=1$ , sendo utilizada para realizar uma padronização dos dados, convertendo a média real nos padrões conhecidos. A padronização executa-se com o auxílio da variável reduzida  $Z$ , apresentada em 2.2 e a sua respetiva função densidade ilustra-se por 2.3 [Pereira e Requeijo, 2012].

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (2.2)$$

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \frac{z^2}{2} \quad (2.3)$$

### 2.1.3 Distribuição F-Fisher

A Distribuição de Fisher, ou de Snedecor, é baseada num processo Normal, como os apresentados em 2.1.2. Tendo a particularidade de representar um rácio entre duas variáveis  $\chi^2$  independentes. Sendo uma  $\chi^2_{v_1}$  com  $v_1$  graus de liberdade e  $\chi^2_{v_2}$  com  $v_2$  graus de liberdade, a distribuição da variável X pode representar-se por 2.4.

$$X = \frac{\frac{\chi^2_{v_1}}{v_1}}{\frac{\chi^2_{v_2}}{v_2}} \quad (2.4)$$

A utilidade desta distribuição será apresentada em 2.4.

## 2.2 Qualidade - Metrologia

Atualmente, a qualidade está muito evoluída comparando aos primórdios da criação, o primeiro a tratá-la foi Joseph Juran. Nos dias de hoje, a Qualidade é um tema com um impacto forte, tanto ao nível de atividades, de processos, como de produtos, existindo mesmo séries de produto hierarquizadas por faixas de qualidade. É ainda sinónimo de melhoria contínua, a respeito de política como organização estratégica tornando-se assim fulcral em todos os sectores de qualquer negócio [Pereira e Requeijo, 2012].

A qualidade pode ser definida de muitas formas. Tornou-se num dos fatores tidos em conta no discernimento aplicado ao consumo, ou seja, a diferença entre dois produtos que correspondam à mesma gama de fabrico, remete sempre para uma comparação da qualidade que as distingue. Existe uma receita de investimento substancial em torno da qualidade, seja ela aplicada à qualidade de produção ou à qualidade da organização e do ramo operacional da mesma. As características da qualidade podem dividir-se por três parâmetros: o físico, o visual e a fiabilidade. Reduzindo a variabilidade, melhora-se a qualidade [Montgomery, 2001].

Existem várias áreas à responsabilidade da Qualidade como CEP - Controlo Estatístico do Processo, Metodologias Lean e Seis Sigma, Metrologia, Desenho de Experiências entre outras. A *Metrologia* é a disciplina responsável por toda e qualquer medição que exista, baseando-se no *Sistema Internacional*, permitindo que toda a sociedade se apoie nos mesmos padrões.

### 2.2.1 Diagrama de Causa-e-Efeito

Um problema possui sempre várias abordagens possíveis para uma resolução eficaz e eficiente. Em 1943, Kaoru Ishikawa, apresentou um gráfico que relaciona as causas e os efeitos por forma a chegar eficazmente à uma identificação do problema. Poderá ser denominado, diagrama de Ishikawa, Causa-e-Efeito ou Espinha-de-Peixe pela sua conceção.

É uma ferramenta eficaz quando aplicada com rigor e primor. A qualidade dos resultados é diretamente proporcional à exigência aplicada durante a sua conceção e aplicação.

Ishikawa sintetizou a metodologia numa abreviatura, curta e explicita, mais facilmente aplicada a ambientes de produção - 6M - onde existem 6 áreas que se podem definir como as causas abrangentes de um problema, sendo elas:

Mão de Obra	Métodos	Máquinas
Meio Ambiente	Materias	Medições

A metodologia consiste em aglomerar o maior número de causas e sub-causas possíveis, através do maior número de intervenientes do processo existentes, visando o rigor, como referido. Em seguida, através da descortinação de todas as noções recolhidas, define-se ações corretivas [Pereira e Requeijo, 2012].

Ishikawa, numa óptica de qualidade ao nível de melhoria contínua, afirmou que a variabilidade de um sistema depende da variabilidade dos seus integrantes, ou seja, reduzindo cada uma das variabilidades individuais, reduz-se a variabilidade do sistema. Note-se que este diagrama é estritamente qualitativo, um problema desta natureza convertido numa abordagem quantitativa resultará num Desenho de Experiências, veremos em 2.3.

No presente caso de estudo abordou-se os dois últimos pontos - Materiais e Medições.

### 2.2.2 Sistema de Medição

Os sistemas de medição são ferramentas importantes, pois permitem relacionar e fazer comparações entre objeto e definir padrões. É um dos objetivos da metrologia, criar sistemas que permitam relacionar valores tangíveis, por forma a criar um ecossistema homogéneo e justo para todos os que o utilizam.

Estes podem ser simples ou complexos. O sistema de medição possui três intervenientes: a mensuranda, o operador, e o instrumento do sistema de medição. Estes últimos podem ser singulares, como uma balança ou uma régua que possuem a escala e o padrão num só utensílio ou um sistema múltiplo como um gabarito e um relógio comparador. Este segundo caso é recorrente em sistemas onde a mensuranda necessita de uma estrutura que a coloque no sistema de medição, uma base para a medição que é necessário realizar.

O caso de estudo presente possui dois instrumentos que constituem o sistema de medição. O primeiro que se apresenta é o *Relógio Comparador*, apresentado em 2.1. A sua

função é realizar uma comparação entre um padrão e o objeto que se está a medir. No caso, o relógio é colocado no padrão e colocado no zero absoluto, de seguida coloca-se o relógio no gabarito e a medição resulta da distância entre o anel de aperto do relógio e a ponteira do cursor que está em contato com a mensuranda.

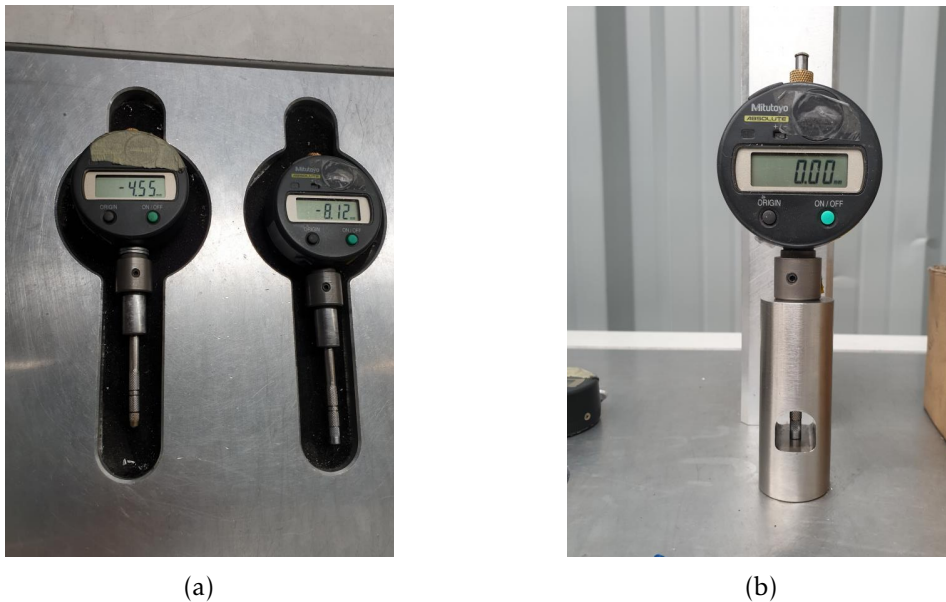


Figura 2.1: (a) Relógio Comparador, (b) Relógios Maquinação e Padrão

### 2.2.2.1 Gabaritos

O modo de controlo na produção das barras é feita através da medição apresentada em certos pontos da geometria do perfil por forma a garantir a geometria final. Os gabaritos têm a função de simular o tejadilho da viatura onde a barra irá assentar. Neste caso de estudo existem dois gabaritos e cada um deles diz respeito a um processo:

- Gabarito de Dobragem;
- Gabarito de Maquinação

Os Gabaritos apresentam a capacidade de avaliar a geometria da peça em dois eixos, o dos  $yy$ 's e o dos  $zz$ 's porque o eixo dos  $xx$ 's considera-se nulo, descrito pela posição onde a barra encosta.

#### Gabarito de Dobragem

O gabarito da dobragem possui 20 pontos: 11 pto's no eixo dos  $zz$ 's e 9 pto's no eixo dos  $yy$ 's, como o perfil encosta no gabarito em  $xx$ 's não é necessário o controlo. O gabarito apresenta-se na figura 2.2. O objetivo neste gabarito é controlar a curva que cada peça apresenta após a dobragem. A posição da peça no gabarito da dobragem é referenciada

pelo' *notch*<sup>1</sup>' que se insere no corte que é feito na máquina de dobragem, de seguida, grampa-se a peça para fixar a posição e procede-se à medição. A figura 2.2 ilustra o notch no gabarito para a verificação da posição correta da peça.

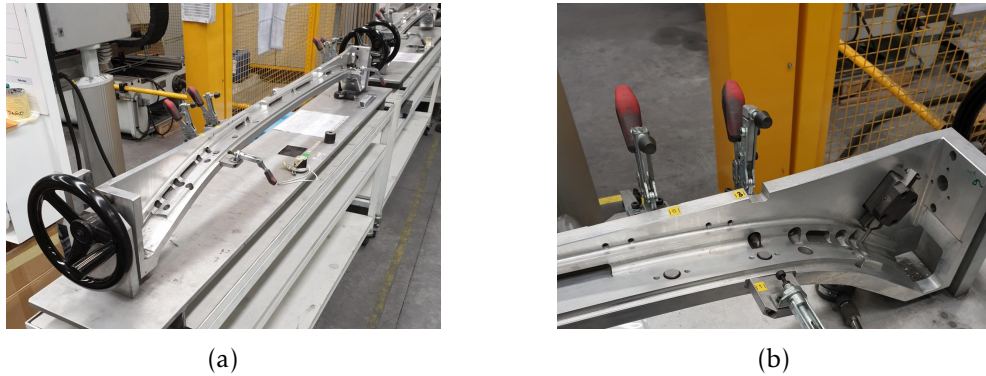


Figura 2.2: (a) Gabarito da Dobragem - (b) Ilustração do *Notch*

O Sistema de medição é composto pelo gabarito e pelo relógio comparador. Os gabaritos possuem furos nos pontos de medição ao longo do comprimento da peça em *zz*'s e *yy*'s. A relação existente entre o gabarito e o relógio funciona num sistema de 'macho - fêmea' para executar a medição. Os meandros deste sistema serão aprofundados no ponto em seguida. O gabarito foi concebido para medir uma cota nominal nula com uma variação, note-se 2.5 (valores ilustrativos).

$$RespostaPi = 0 \pm 0,8[mm] \quad (2.5)$$

### Gabarito de Maquinação

O gabarito da maquinação possui uma estrutura diferente. A geometria é igualmente importante, porém, neste ponto ganha uma dimensão diferente. Primeiro, pela necessidade de controlar mais características e segundo, pelo facto da peça maquinada definir a geometria final. A função deste gabarito é controlar os furos realizados na peça - ao nível do diâmetro e da posição - e a maquinação que é realizada nos contornos da peça. A figura 2.3 ilustra o gabarito.

---

<sup>1</sup>notching - Furo ou corte preciso executado numa extremidade, com o fundamento de referenciar ou marcar uma zona da peça. O notch está colocado num local específico da máquina de dobragem e é realizado para relacionar as atividades do processo, criando um rastreio.

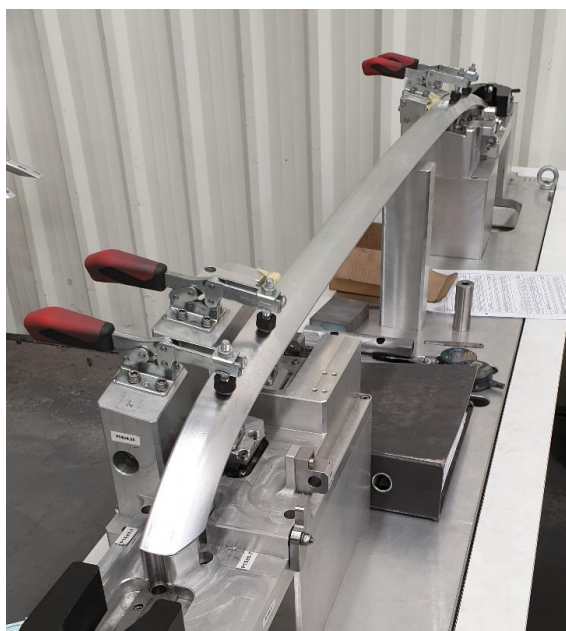


Figura 2.3: Gabarito de Maquinação

### 2.2.2.2 Incertezas

Em metrologia, nos sistemas de medição existe uma consequência inevitável, as incertezas nas medições. A medição é resultante do somatório do valor real com a incerteza. As incertezas são influenciadas por erros.

Existem alguns tipos de erros, nomeadamente os sistemáticos e os aleatórios.

Os erros sistemáticos são erros de medição notados em medições repetidas que permanecem constantes ou variam de um modo identificável [Mello et al., ].

O erro aleatório é resultado da diferença existente entre o erro de medição e o erro sistemático [Mello et al., ].

A origem destes erros pode ser variada. No presente caso destacam-se dentro dos erros sistemáticos: o uso incorreto dos instrumentos de medição, a interpretação incorreta dos resultados e os erros executados por medições habituais, influenciando a simplificação dos processos. Existem ainda origens que podem ser consideradas aleatórias ou sistemáticas, tais como: pressão de contacto, imperfeições de fabrico dos instrumentos de medição e erros devido ao desgaste dos aparelhos.

No ambiente fabril existem medições regulares, realizadas durante os três turnos diários, mais do que uma vez por turno, facto que alberga erros sistemáticos. De seguida serão apresentados alguns casos específicos comuns desta unidade fabril.

Um dos erros referidos anteriormente foi a pressão realizada durante a medição, espelham-se em seguida dois exemplos:

Na figura 2.4 ilustra-se um exemplo desse erro. A estrutura macho do sistema está concebida para ser inserida no anel visível na figura, resultando entre elas uma superfície

de contacto. Esta superfície com a pressão realizada no relógio e pela ausência de um ponto de fixação, permite que o relógio rode a 360° causando variabilidade sistemática.

A figura 2.5 ilustra um segundo exemplo desse erro. O sistema do relógio comparador funciona com um cursor que corre dentro da estrutura plástica, que por sua vez, está ligada ao mostrador electrónico. Visualizando a imagem verifica-se o local onde o operador realiza a medição. O macho representado na figura 2.4 é apertado na base do relógio, local onde internamente corre o veio. Este fator obriga o aperto a ser relativo, incorrendo o risco de o cursor ficar fixo e invalidar a utilização do relógio.

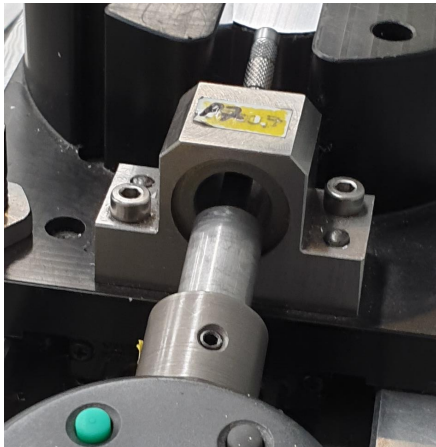


Figura 2.4: Sistema Macho-Fêmea



Figura 2.5: Posição de Medição

Os sistema de medição possuem incertezas inerentes ao processo. Nas três figuras apresentam-se incertezas de medição que convergem em erros sistemáticos e ou aleatórios.

Nas figuras 2.4 e 2.7 apresentam-se dois pontos nos quais estão a ser realizadas medições habituais. Na figura 2.8 apresenta-se a zona da peça que foi medida na figura 2.7, visualizando-se o local exato onde a ponteira do relógio estabelece o contacto para a medição. Notou-se que a peça é extremamente irregular devido à gênese do seu *design* e ao corte por arranque de apara realizado por fresas. Existe um erro sistemático porque não é possível repetir duas medições no mesmo local da peça.



Figura 2.6: Medição - P8



Figura 2.7: Medição - P9



Figura 2.8: Medição - P9

### 2.2.3 Repetibilidade e Reprodutibilidade - R&R

R&R é um estudo que tem o objetivo de validar um sistema de medição, analisando a fiabilidade ao nível da repetibilidade e da reprodutibilidade. Este estudo torna-se necessário devido à variabilidade dos sistemas de medição que está imputada aos aparelhos de medição e aos operadores (2.2.2).

Posto isto, pode então realizar-se este estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade através de várias técnicas:

- Método de Amplitude;
- Método de Média e Amplitude (incluindo o método de Cartas de Controlo)
- Método da análise de variância - *Anova*

O método Anova e o método da Média e Amplitude são semelhantes e ambos muito utilizados. Existe alguma preferência pelo método Anova pela vantagem que este apresenta, designadamente, a capacidade de inferir na interação entre os fatores que são analisados. Já o método da média e da Amplitude não possui a mesma versatilidade. Neste caso de estudo vamos utilizar o método da Média e da Amplitude.

Para se compreender o estudo e o seu objetivo é necessário fundamentar as duas ideias base. A repetibilidade é a área que abrange a variação do equipamento, a verificação de que este está apto a repetir as mesma mensurandas quando colocado sobre as mesmas condições - procedimento, operadores, sistema de medição e condições - por forma a apresentar a sua fidelidade.

Já a reprodutibilidade aplica-se à variação de algumas das condições de medição, averiguando assim se o sistema consegue manter a fidelidade e aptidão. Ou seja, espelha a variação dos operadores quando estes são sujeitos às mesmas condições de medição

#### **Estudo R&R**

O estudo deverá ser realizado pelas regras estabelecidas pela metrologia [LLC et al., 2010]. Existe alguma liberdade dentro do estudo relativamente ao número de operadores utilizados, ao número de peças escolhidas para amostragem e ainda ao número de repetições realizadas. Em seguida será realizado o estudo baseado no procedimento:

1. Obtem-se uma recolha de  $n$  amostras que representem a variação do processo atual ou expectável;
2. Representar os operadores por letras e as amostras escolhidas por números, de 1 a  $n$ , sem que os operadores tenham conhecimento do sistema de marcação;
3. Calibrar o sistema de medição se esta ação for parte do procedimento natural. Permitir que o operador A meça as  $n$  amostras por uma ordem aleatória;
4. Permitir que os outros operadores meçam as  $n$  amostras, sempre por ordens aleatórias sem que estes vejam as medições dos outros elementos.

5. Repetir o processo até completar as repetições a que o estudo se propôs desde o início [LLC et al., 2010].

### **Análise do Estudo R&R**

**Análise Gráfica** - Como já foi referido anteriormente reconhece-se que antes de qualquer análise estatística se deverá averiguar se existem *outliers*<sup>2</sup> e perceber a razão do seu aparecimento. Em seguida pode então proceder-se à análise gráfica. Utilizou-se os gráficos de Média e Amplitudes, como visto em 2.2.3. Existem assim dois tipos de gráficos que se podem analisar dentro do gráfico de médias. Primeiramente, pode averiguar-se o desempenho dos operadores escolhidos de um modo geral de medições e em seguida um gráfico semelhante mas onde os operadores aparecem individualizados, veremos adiante. Em relação à carta de amplitudes, esta é utilizada para se averiguar se o processo está dentro de controlo. Os limites de controlo são sempre intrínsecos às medições e é por esse facto que os *outliers* devem ser retirados por forma a não perturbar o sistema. Deverá começar-se por desenhar uma carta geral com as amplitudes e analisar o desempenho, se estão todos dentro dos limites, significa que estão todos a medir do mesmo modo, se existe um fora dos limites ou que apresenta um padrão diferente significa que não acompanha o modo dos outros operadores [LLC et al., 2010].

## **2.3 Desenho de Experiências**

O desenho de experiências (*Design of Experience - DOE*) é uma área da qualidade capaz de criar e simular cenários por forma a realizar testes para retirar ilações de um qualquer processo. É uma metodologia que teve o início do seu desenvolvimento em meados de 1900 com um agricultor inglês, de nome *Ronald A. Fisher* que teve a necessidade de estudar o comportamento das suas plantações. A meio do século XX já existiam estudos e ligações à álgebra matemática, por meio de matrizes ortogonais e fracionamento das mesmas. Os desenvolvimentos posteriores foram realizados por grandes interpretes da matemática e da estatística, entre eles *F. Yates, E. Pearson, M. Bartlett, D. R. Cox, George Box* e ainda *Douglas Montgomery* [Pereira e Requeijo, 2012]. É uma área abrangente que possui muitas ferramentas e vários modos de conceção, uma dessas ferramentas que o DOE utiliza é a Análise de Variância.

## **2.4 Análise de Variância - Anova**

### **2.4.1 Apresentação de Pressupostos**

A Análise de variância é uma ferramenta da área estatística que permite que se compare características representativas das distribuições entre duas ou mais populações. Tendo

---

<sup>2</sup>Outlier - é um estrangeirismo utilizado para defenir uma medição que se encontra fora de especificação, esporádica.

assim a capacidade de separar a variabilidade total por classes subditas, ou seja, fornece a possibilidade de descobrir a origem da variabilidade [Pereira e Requeijo, 2012].

Daqui por diante, 'Análise de Variância' será utilizada por meio da nomenclatura anglo-saxônica, *analysis of variance* - . A *Anova* depende de fatores e níveis, cujas análises resultantes são combinações variadas de ambos estes parâmetros.

Para a utilização da Anova existem pressupostos que tem de ser cumpridos, como a verificação da normalidade, a independência dos dados e a homogeneidade da variância.

### 2.4.2 1 fator, Vários Níveis - One Way Anova

O processo toma aqui uma nova abordagem, um cenário criado pelo desenho de experiências. Com vista ao objetivo, varia-se as características controláveis do processo para analisar se os efeitos são significativos na resposta. Para realizar esta análise às respostas utiliza-se testes de hipóteses de modo a averiguar se os efeitos são significativamente diferentes de zero. Deste modo, pode realizar-se o teste às médias. Elaboram-se duas hipóteses, a que se pretende provar e a sua complementar. A equação 2.6 ilustra o teste de significância das médias.

$$\begin{aligned} H^0 &: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n \\ H^1 &: \mu_i \neq \mu_k \end{aligned} \quad (2.6)$$

A tabela *Anova*, ??, apresenta o teste que consiste em comparar o  $F_0$  ao valor representativo  $F_{Crítico}$ . Conclui-se que a hipótese  $H^0$  deve ser rejeitada caso o  $F_0 > F_{Crítico}$ .

Tabela 2.1: *Anova*

Fonte de Variação	SS	g.l.	MS	$F_0$	$F_{Crítico}$
Entre Níveis (B)	$SS_B$	$a - 1$	$\frac{SS_B}{a-1}$	$\frac{MS_B}{MS_W}$	$F_{\alpha; v_n; v_d}$
Erro (W)	$SS_W$	$N - 1$	$\frac{SS_W}{N-1}$		
Total	$SS_T$	$N - 1$			

A variação Total,  $SS_T^3$ , dos dados experimentais é resultante da soma dos quadrados dos desvios de cada uma das observações em relação à média amostral. Traduz-se na equação 2.7.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2, \text{ com } (N-1) \text{ g.l.} \quad (2.7)$$

O SST pode também ser caracterizado pela soma de  $SS_B$  e  $SS_W$ , equação 2.8.

<sup>3</sup> $SS_T$  - Total Sum of Squares

$$SS_T = n \sum_{i=1}^a (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 = SS_B + SS_W \quad (2.8)$$

$SS_B^4$  representa a variação entre os níveis, matematicamente, é a soma ponderada dos quadrados das diferenças entre as médias e a média global. Como o fator está a ser analisado dentro de  $a$  níveis, o número de graus de liberdade é  $(a - 1)$  [Pereira e Requeijo, 2012].

$SS_W^5$  é ilustrativo da variação dentro dos próprios níveis, também se pode designar por *Erro* ou *Variação Residual*, analiticamente representa-se pela soma dos quadrados dos desvios das observações em relação às médias dos respetivos níveis. O número de graus de liberdade do  $SS_W$  espelha-se por  $(N - a)$  e afere-se através da equação 2.9 [Pereira e Requeijo, 2012].

$$(N - 1) = (a - 1) + (N - a) \quad (2.9)$$

Com as variações e os graus de liberdade definidos e através de uma razão pode calcular-se as variâncias, resultando o terceiro elemento apresentado na tabela ??, o  $MS^6$ , que significa variância.

Por fim, utiliza-se a distribuição de Fisher, recuperando o subcapítulo 2.1.3, a distribuição é utilizada quando existe um rácio entre duas variáveis, neste caso variâncias. O resultado deste quociente é a estatística de teste.

Os parâmetros do  $F_{Crítico}$  são consultados na tabela F-Fisher. *Alpha* resulta do nível de significância, habitualmente o nível de significância é 95% o que significa que o  $\alpha = 5\%$ , e é o primeiro coeficiente da distribuição. Os graus de liberdade são  $Vn$  e  $Vd$  representando os graus de liberdade numerador e do denominador, respetivamente.

### 2.4.3 2 fatores, Vários Níveis - Two Way Anova

O Desenho a 2 fatores é relativamente mais complexo que o primeiro apresentado. O processo e os objetivos mantêm-se, a diferença reside somente nas *Fontes de Variação*, uma vez que possui mais entradas no processo e replica mais saídas. Deste modo, surgem mais relações entre os fatores, mais relações entre os níveis e entre as interações dos níveis com cada um dos fatores.

## 2.5 Capacidade do Processo

Um processo de produção possui duas fases, a atividade em causa e os padrões dentro dos quais a mesma deve ser executada. Os processos têm um *input*<sup>7</sup> e um *output*<sup>8</sup>, o

---

<sup>4</sup> $SS_B$  - *Between Sum of Squares*

<sup>5</sup> $SS_W$  - *Within Sum of Squares*

<sup>6</sup>MS - *Mean Square*

<sup>7</sup>Chama-se input à alimentação do processo, a chegada do material a uma atividade.

<sup>8</sup>É representativo da saída do processo, do produto depois da atividade, com valor acrescentado ou não.

grande foco envolve sempre a questão de quais serão os inputs necessários para os outputs desejados. No fundo, a receita ideal para a produção perfeita com os recursos mínimos. O processo ganha um novo índole, a capacidade do processo, que tem necessidades referentes às especificações do produto. Definindo se o processo é capaz de produzir dentro de especificação, ou não. A capacidade do processo espelha as causas comuns de variação, implicação que reflete que os *outliers* são erros comuns, ou seja qualquer alteração que deva ser introduzida, tem de ser algo profunda, porque os erros que estão a aparecer são estruturais e não esporádicos. Esta análise é muito importante devido ao facto de possibilitar: previsões de produção referente às especificações, seleção mais adequada e pormenorizada dos fornecedores, a redução da variabilidade do processo e a descoberta ou modificação de processo ou de alguma máquina [Pereira e Requeijo, 2012].

O processo é sempre um tema delicado e extremamente complexo. Ishikawa afirmou que um problema possuía 6 divisões intrínsecas ao processo: Mão de Obra, Equipamentos, Materiais, Meio Ambiente, Medições e Métodos. Isso implica diretamente que a variabilidade do processo está, logo à partida, em seis divisões possíveis. Habitualmente colocasse os dados nas cartas de controlo para averiguar se o processo está, ou não, sob controlo estatístico [Pereira e Requeijo, 2012].

A capacidade do processo foi evoluindo e sendo estudada ao longo dos tempos. Existe atualmente os *índices da capacidade do processo* que foram concebidos para se avaliar se um processo por si só é capaz de produzir dentro de especificação. Há bibliografia que defende que resultam '3 gerações de *índices*' [Pereira e Requeijo, 2012], nesta dissertação vamos só focar o mais importante, ou o primário  $C_p$ . Como vimos acima, a distribuição normal, é uma das distribuições mais utilizadas e que melhor se ajusta às distribuições dos processos fabris.

Partindo do princípio que o processo tem uma distribuição normal ( a verificar ) vamos considerar uma a variação do processo igual a  $6\sigma$ <sup>9</sup>. Assim, vem que 99,73% dos valores estão dentro do intervalo representante de  $\mu \pm 3\sigma$ . Se a variável for aproximadamente normal deverá garantir-se pelo menos 99%. Note-se que,  $\mu$  representa a média da população.

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (2.10)$$

$C_p$  é então conhecido por capacidade potencial. Possuindo um valor limite mínimo de capacidade de 1,33, sendo este o aceitável para a especificação bilateral. A produção pode ainda assim não estar assegurada, ou seja, o processo pode definir-se como capaz mas se não estiver centrado pode implicar que está a produzir fora dos limites devido ao desvio em relação ao valor nominal. Resultante desta possibilidade existiu a necessidade de criar mais gerações de indicadores,  $C_{pk}$ . Este possui dois valores, o  $CPK_i$  e o  $CPK_s$  denominando assim o inferior e o superior, respetivamente. O objetivo é dividir o intervalo

<sup>9</sup> $\sigma$  representa o desvio padrão de uma amostra/população

que foi definido anteriormente em duas partes iguais com o intuito de averiguar o centro do processo.

Dado por,

$$(Cpk)_i = \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \quad (2.11)$$

$$(Cpk)_s = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \quad (2.12)$$

Consequencialmente, cria-se então uma norma de duas condições para averiguar se de facto o processo está de acordo com o pretendido, capaz e centrado, a primeira já referida na equação 2.10,  $C_p \geq 1,33$ , e a segunda para garantir que o processo está centrado,  $C_{pk} = C_{pk_s}$ .

É de notar que ainda existe uma terceira geração,  $C_{pm}$ , que não vai ser abordada por não ser necessária no estudo.

## ESTUDO DE CASO

### 3.1 Estudo de Caso

#### 3.1.1 Empresa

A entidade onde o estudo foi realizado é uma empresa do ramo automóvel com uma vasta experiência na produção de acessórios para automóveis. A sua fabricação envolve barras de tejadilho longitudinais.

Não existirão mais dados acerca da empresa por motivos de confidencialidade.

#### 3.1.2 Material - Alumínio

O material utilizado nas longarinas é alumínio. O mesmo é muito utilizado na indústria automóvel devido às suas características, nomeadamente a relação existente entre o peso, propriedades mecânicas e baixo custo.

O alumínio possui uma característica denominada envelhecimento natural, ou seja, desde a altura em que ele é extrudido existe uma linha de vida onde as condições mecânicas vão endurecendo. Existe ainda o envelhecimento acelerado, é realizado por meio de temperas.

Existe uma propriedade mecânica que se descreve por um regime elástico-plástico presente nos materiais. É a capacidade de extensão de um material até que este encontre a rotura. O Módulo de Young é o declive da recta que representa o regime elástico. Calcula-se através do alongamento do material, quando este é submetido a ensaios de tração.

A liga tem um código que possui 3 fatores: o primeiro, de duas letras - AA (Aluminium alloy / Liga Alumínio) - que define a liga. O segundo de 4 dígitos, traduz a série de alumínio que está a ser tratada, existem várias séries que são trabalhadas com tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, caso das séries, 2xxx, 6xxx, 7xxx e

algumas 8xxx. No caso de estudo trata-se as ligas 6XXX, mais especificamente a 6060, que traduzem a estrutura da liga, ao nível de grão, por exemplo. Por último, uma letra e um número que identificam o tratamento térmico que foi aplicado (T4/T6/T7), correspondendo a comportamento mecânicos apresentado por cada uma das ligas nesse estado de tempera. Tratamento T4, significa que foi tratado termicamente (solubilização) e envelhecido à temperatura ambiente. Tratamento T6, significa que foi tratado termicamente (solubilização) e envelhecido artificialmente (meio de forno).

### 3.1.3 Processo Fabril

O produto desenvolvido na empresa é constituído por dois grupos de peças, o primeiro que inclui a estrutura - constituído de alumínio (barra) - e o segundo grupo que é constituído por todas as partes que assentam na barra para permitir o acoplamento ao carro, como: os parafusos, 'rivnuts'<sup>1</sup> e elementos plásticos.

O fluxo de produção completo vai desde a receção de lotes de alumínio extrudido, AA 6060 T4, chamado de perfil, até ao final da linha de montagem onde se possui uma barra de tejadilho longitudinal. Esta produção pode repartir-se em três módulos:

- Físico - etapas do processo com o objetivo de obter a geometria final da peça;
- Visual - etapas do processo que conferem o aspecto superficial das peças (polimento ou pintura);
- Montagem - montagem final.

Neste caso de estudo o foco principal recai sobre o módulo físico.

A matéria-prima é transportada do fornecedor em contentores de extrusão que foram embalados e enviados para a fábrica. O processo de fabrico é constituído por três atividades. A primeira atividade é a dobragem - 'Strech Bending', a segunda, é o tratamento térmico, e a terceira e última, a maquinação do perfil. O objetivo do processo é converter um perfil horizontal na geometria final requerida pelo cliente.

A sequência do processo de produção está intrinsecamente ligada às características do material. Como referido no sub-capítulo 3.1.2, o alumínio possui tratamentos que definem as suas propriedades mecânicas. Os produtores da dobragem definem que a máquina deve dobrar o alumínio em AA 6060 T<sub>4</sub> - por motivos de redução da variabilidade de produção e por proteção da máquina, evitando esta de realizar forças excessivas naturais num estado de envelhecimento do alumínio mais evoluído - sendo AA 6060 T<sub>4</sub> um dos primeiros estados do envelhecimento natural, obriga a dobragem a ser o primeiro processo da cadeia. O termo endurecimento é a segunda atividade do processo e a maquinação encerra o processo físico.

A figura 3.1, ilustra o processo representado num fluxograma.

---

<sup>1</sup>Peça metálica que se insere num furo, designada bucha metálica, criada para metais e chapas que é montada à pressão para permitir a fixação e criar uma rosca.

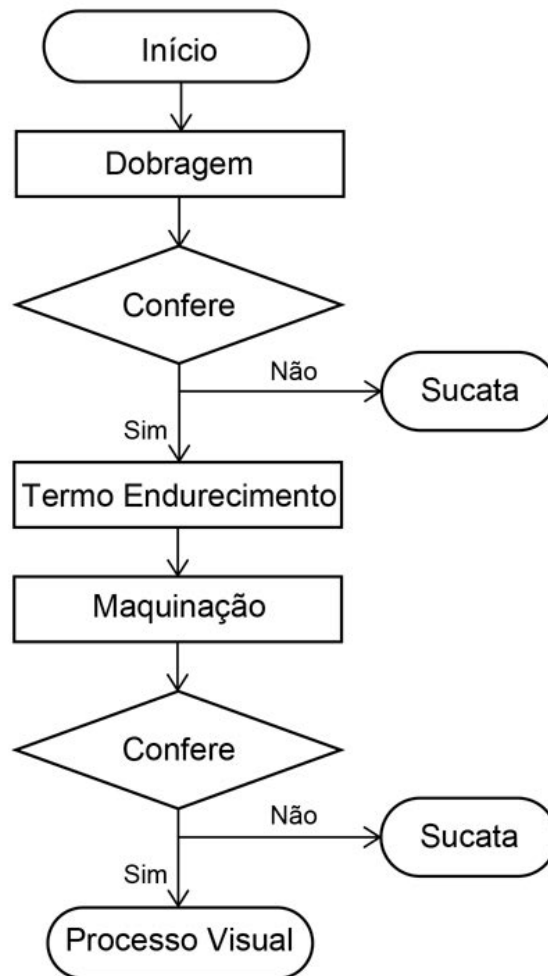


Figura 3.1: Processo Fabril - Físico

No final do sub-capítulo 3.1.3, está ilustrada uma figura, referente ao processo, representado num esquema real - Figura 3.4

#### **Dobragem - Strech Banding**

É um processo de dobragem recente realizado por uma máquina constituída por duas torres nas extremidades e uma matriz ao centro. Cada torre possui dois braços onde cada braço tem um par de garras e um mandril<sup>2</sup>. O perfil é colocado nos braços da máquina. Quando inicia o processo, os mandris (um de cada lado da peça) entram dentro do perfil e quando estes chegam ao fim do curso, as garras de cada torre grampeia o perfil e esticam-no para retirar tensão à peça e reduzir as estrias de uma dobragem convencional. No instante seguinte, as duas torres levam e prensam o perfil contra a matriz tracionando-a a cada instante até à geometria final de dobragem. Apresenta-se na figura 3.2 o início e fim do curso da dobragem.

<sup>2</sup>Mandril - é um objeto feito de uma resina extremamente dura que tem exactamente o desenho do perfil e o comprimento similar ao da dobra, cuja função consiste em entrar dentro das pontas do perfil e evitar que durante a dobragem do mesmo, este se amolgue ou altere o desenho da matriz do perfil.



Figura 3.2: Máquina de Dobragem - Início (a) e Fim do Curso (b)

O processo de dobragem é desenvolvido para apresentar uma variabilidade mínima. As torres e os braços fazem todo o processo programados através da trajetória da peça até ao final da matriz, executando assim a dobragem do perfil. A máquina possui dois modos de correr o programa da trajetória: o modo de força e o modo de alongamento/distância.

O modo de força consiste em colocar na máquina um qualquer perfil, definir a força que se pretende e quando se executa o programa, a máquina aciona essa força previamente definida ao longo do programa todo, baseando todo o seu trajeto na força.

No modo de alongamento, a máquina percorre o programa baseado no alongamento do material ou na distância entre as torres. Ou seja, a cada instante que a máquina está em execução da sua trajetória, mede a distância existente entre as torres e grava esse ficheiro.

A máquina possui ainda duas funções que articulam ambos os modos, o *record* e o *play*. O *record* tem como *input* o modo força e enquanto este opera a máquina grava a cada instante a distância entre as torres, gravando assim o alongamento da peça desde a posição inicial até à geometria final. O *play* vai executar a gravação executada pelo *record* 'esquecendo' a força e replicando somente o comportamento apresentado pela peça que se gravou anteriormente, baseado nas distâncias entre as torres, ou seja, o *input* da execução dentro do *play* passa a ser então o modo do alongamento do material.

Por exemplo, operando no modo *play* posteriormente à gravação de um perfil teste que tenha sido colocado na máquina, esta irá apresentar um de dois comportamentos, ou se coloca um perfil mais macio e a máquina fará menos força para executar a trajetória ou o perfil colocado como *input* na máquina é mais duro, a máquina fará mais força, mas em qualquer um dos casos repete o alongamento apresentado no perfil teste.

No final do processo da dobragem antes da máquina aliviar os grampos que acondicionam o perfil, existe um corte realizado na traseira do perfil, é uma função conhecida como '*Notching*' que tem por objetivo fazer um corte altamente preciso num ponto de referência da peça que está a ser cortada. Este corte é o elo de ligação entre a dobragem e a maquinação. Veremos atentamente adiante.

No fim do curso da dobragem, a peça que tinha sido grampeada no início é solta e nesse preciso instante existe a recuperação elástica que se descrevia em 3.1.2.

Assim que este processo termina, o material está pronto para a próxima atividade da cadeia, o forno.

### **Termo Endurecimento - Envelhecimento Acelerado**

É realizado para providenciar à longarina as propriedades mecânicas finais necessárias, com o objetivo de que as funções para as quais foi concebida sejam cumpridas devidamente, ou seja, resistir à carga e a todas as forças exercidas quando a viatura se encontrar em movimento. A atividade consiste em 20 horas de forno a 200°C e converte AA 6060 T4 em AA 6060 T6. Note-se que o intervalo temporal e a temperatura apresentados são meramente ilustrativos.

Como referido em 3.1.2, só o estado T6 apresenta as devidas características mecânicas, e sendo estas as exigências do cliente ao nível da segurança, têm necessariamente de estar cumpridas.

No fim do tempo de forno estar decorrido, o material tem de arrefecer para ser maquinado, não sendo viável maquinar o material sem que o mesmo esteja à temperatura ambiente.

### **Maquinação**

É o último processo do estudo e é realizado por um equipamento onde a atividade está dividida em duas partes. A primeira consiste em cortar o perfil, através de serras e a segunda, realizar a furação e desenhar os contornos das extremidades do perfil através de ferramentas acessórias ao equipamento de maquinação denominadas por fresas, alcançando a geometria final. A atividade é executada do seguinte modo, o operador coloca o perfil dobrado e temperado nas garras da máquina, numa posição específica referenciada pelo *notch*(jig existente no equipamento de maquinação). Como vimos na dobragem, este vai indicar ao operador e à máquina onde a peça deve ser colocada, para que os declives da dobragem estejam nos sítios certos para a grampagem e conseqüente corte.

O *notch* possui um sensor de validação, sem este sensor activo o operador não consegue executar o 'iniciar'<sup>3</sup>, ou seja, o *notch* que a máquina da dobragem marcou quando alcança a maquinação tem que assentar exactamente em cima do sensor de validação. Este sistema que assegura a rastreabilidade da peça entre processos e que iliba o operador de qualquer responsabilidade de posicionamento da peça.

---

<sup>3</sup>Função que dá arranque à máquina para que esta execute a maquinação.



Figura 3.3: Equipamento de Maquinação

Para além da validação do *notch*, a máquina só permite o arranque quando o operador desocupa as *barras de segurança*<sup>4</sup> e qualquer movimento dentro das barras de segurança pode comprometer o processo.

A máquina executa a grampagem do perfil e este passo é fulcral no processo. As funções realizadas pela máquina estão relacionadas com um programa que opera os robôs. Este robôs são constituídos por fresas e por serras. O programa possui uma trajetória específica e atenção que recai sobre a interpretação do programa. A máquina executa o que o programa define no CAD<sup>5</sup>. A grampagem é fulcral para desempenhar a união do referencial virtual ao referencial da mesa onde o perfil foi inserido.

Esta função possui as suas desvantagens. O grampeamento implica que a máquina força os perfis ao seu referencial nulo, ação que desencadeia duas ideias, uma primeira altamente vantajosa - independentemente do perfil colocado, a máquina corta-os constantemente no mesmo local - e uma segunda ideia menos vantajosa - a grampagem força a peça a uma determinada posição, significando que a dobragem pode ficar comprometido.

Após a grampagem, a mesa roda para a área de corte, onde existem três robots, dois deles (nas extremidades), os quais possuem uma serra e uma fresa e o terceiro (central) é constituído apenas por uma fresa.

A função dos *robot's* das extremidades passa por cortar o perfil com a serra e realizar os contornos da geometria final por meio da fresa. O *robot* central está encarregue de realizar os oito furos presentes da geometria final, sendo quatro destes com um diâmetro de 7mm e outros quatro com um diâmetro de 9mm. Os três *robot's* realizam as trajetórias em simultâneo e no fim das mesmas, os *robot's* regressam à posição inicial e estão prontos para um novo ciclo. Por sua vez, a mesa roda de novo para o operador retirar o perfil, neste momento com a geometria final. O operador retira o perfil da máquina, limpa a peça com

---

<sup>4</sup>As barras de segurança são sensores que existem na entrada da máquina, onde o operador costuma desempenhar as suas atividades e mantém o contacto com a máquina que servem para manter a segurança dos operadores. Deste modo, a máquina só opera quando essa zona se encontra livre, o operador possui sempre uma distância de segurança da máquina

<sup>5</sup>programa onde se desenham peças e trajetórias de robôs.

ar comprimido e coloca a peça no buffer encerrando o fluxo de produção anteriormente designado por físico.

#### Dureza (extra)

Existe uma atividade extra, que consiste na medição de dureza do material, é realizada por um alicate de Webster e executada esporadicamente para verificar a dureza dos perfis, averiguando se o material tem, ou não, tratamento térmico. Está exposta no fim do subcapítulo por ser uma atividade externa ao processo de fabrico.

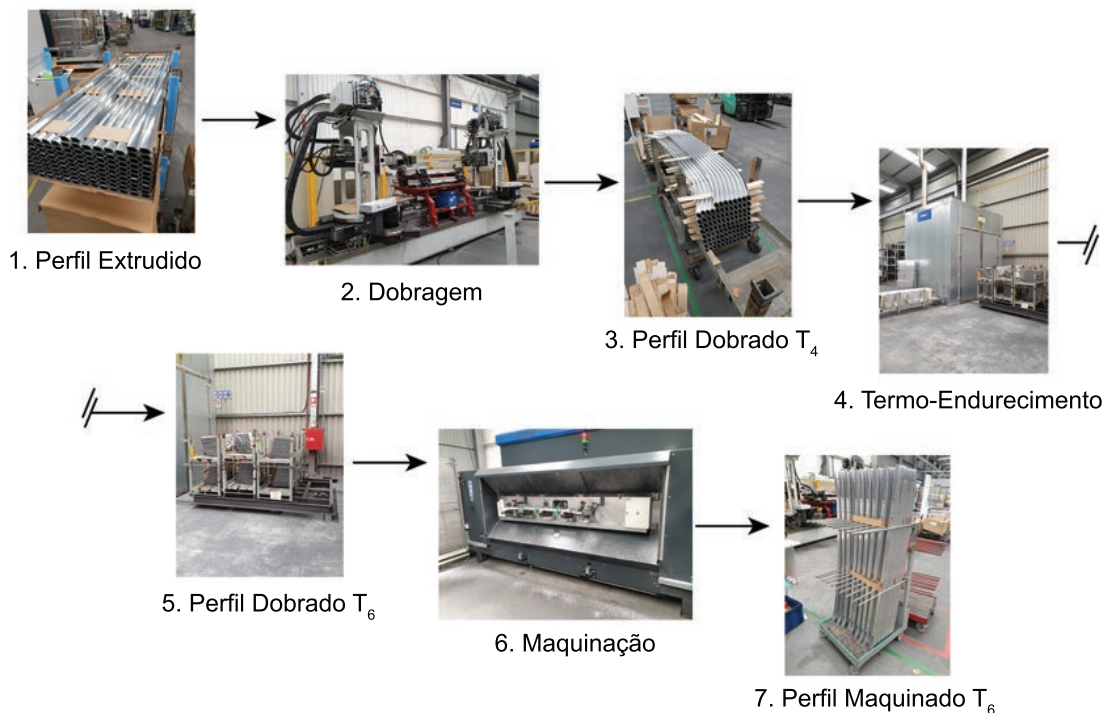


Figura 3.4: Processo Fabril - Real

#### 3.1.4 Problema - Necessidade

O caso de estudo surge na necessidade de conciliar a utilização de matéria prima proveniente de dois fornecedores distintos num único fluxo de produção. O processo atual possui dois fornecedores de alumínio, ou seja duas marcas de material diferentes que obriga a fábrica a ter dois processos distintos. Assim, o modo de produção torna-se delicado na medida em que o processo, para além da dependência das máquinas, depende dos operadores e dos programas que estes têm de inserir na máquina consoante estão a produzir o material  $x$  ou  $y$ .

Como referido em 2.2.1 por Ishikawa, se se reduzir a variabilidade individual de cada um dos intervenientes do processo, reduz-se a variabilidade total. Esta base de programas alternados complica o ambiente de trabalho, arriscando-se produção não conforme. Aqui começa a gravidade de uma variabilidade de produção, aparentemente insignificante, pode ganhar potencial e tornar-se prejudicial. Acontece que um lote fora de especificação,

implica um atraso para os processos seguintes, seja ele o de pintura ou de anodização. Peças que projetam um provável atraso na linha de montagem de PA<sup>6</sup>, correndo o risco de, na pior das hipóteses, incorrer-se num atraso de entregas de peças ao cliente. Falhar uma entrega significa um custo muito elevado para a empresa, daí a extrema importância da estabilização do processo de fabrico de toda a linha de produção.

A indústria automóvel é uma das indústrias mais exigentes, implicando que a empresa produtora do material transacionado só pode enviar peças conformes, dentro de especificação geométrica e visual. Este tipo de comércio, B2B<sup>7</sup>, tem uma implicação direta, onde todo o material defeituoso é imputado à empresa produtora. Para além deste facto, a produção não conforme enviada para o cliente, tem represálias que vão sendo mais severas quando cumulativas".

Existe uma hipótese de corrigir alguma lacuna de produção pontual, a título de exceção, e quando o defeito não é visível para o cliente final<sup>8</sup>. Imagine-se um erro esporádico num lote, de forma a contrariar o desperdício, o departamento de engenharia pode fazer uma amostra com o defeito e enviar para o produtor das viaturas requerendo uma aprovação para o envio daquele defeito.

Os defeitos podem ser de dois tipos, visuais ou funcionais. Os funcionais são os mais delicados, quando ocorrem por exemplo ao nível dos furos, é necessário realizar testes de esforço de pressão. Se o cliente aprovar o material defeituoso que estava retido, este pode seguir para produção com uma concessão de engenharia, onde se afirma que o cliente aprovou aquele defeito pontual e que a empresa pode seguir a produção com aquela anotação especial.

Todas as situações descritas acima têm de ser evitadas. Deste modo, a necessidade passa por encontrar um método de fabrico onde o processo seja robusto para produzir ambos os fornecedores (N e S) dentro de especificação sem lapsos.

Existem ainda necessidades secundárias. Não existe uma verificação do material quando este chega à fábrica e não sendo claro o tempo de envelhecimento apresentado pela empresa fornecedora, torna-se desconhecido à partida a condição do material que é produzido. Deste modo, seria pertinente utilizar a medição da dureza por forma a compreender se esta característica descreve o estado natural e o envelhecimento do material.

Outras reflexões oportunas encontram-se na dobragem, onde existe a carência de tacto no processo, estando em causa a prestação da atividade. Consequência do aparecimento de lotes na linha de montagem que se encontram fora de especificação. Assim, a necessidade abrangeria a perceção da dobragem ao longo do tempo relativamente à possibilidade de recuperação elástica do material que compromete a geometria.

A dobragem pode ser definida por uma aplicação de tensões sobre um material, o

---

<sup>6</sup>PA - Produto Acabado

<sup>7</sup>'Business to business' - quando existe um negócio feito entre duas empresas, ou seja, não existe uma venda ao público

<sup>8</sup>Cliente final - público consumidor das viaturas

termo endurecimento como atividade exige um olhar crítico devido às elevadas temperaturas que podem aliviar tensões e provocar um anulamento de algumas inclinações assentes na curva de dobragem.

A maquinação é o último processo, e tem a função de maquinar o perfil dobrado e temperado convertendo-o na geometria final e por norma não acusa causas especiais de variação. A produção reflete-se eficiente sempre que a dobragem está capaz. Existe uma série de situações onde o engenheiro de processo tem de intervir e colocar o programa de corte de forma a corrigir alguma variação que ocorreu anteriormente para possibilitar a produção OK. A necessidade nesta fase do processo corresponderá a evitar todas estas intervenções pontuais e desnecessárias.

### 3.2 Metodologia

Todo este subcapítulo foi sendo desenvolvido ao longo de 3 meses de observações diárias rodeado de pessoas necessárias, elementos da qualidade (engenheiros e supervisores de conformidade), engenheiros de processo e elementos da produção (operadores e chefes de turno). Foi um período de partilha de conhecimento e acompanhamento do dia-a-dia da fábrica, dos problemas que foram surgindo e das soluções aplicadas para os mesmos.

Paralelamente, foram ocorrendo reuniões onde estas três áreas foram reportando as dificuldades existentes na fábrica. Dificuldades que atrasam ou prejudicam tempos de ciclo, cadências de produção, níveis de qualidade e números de produção.

Como referido no sub-capítulo 2.2.1, um problema pode ser resolvido de uma forma eficaz aplicando o diagrama se Ishikawa, no entanto a abordagem a este problema estaria destinada e assente sobre os ramos das medições e das matérias-primas.

Consequentemente, e apesar da metodologia já ter deliniado o raio de ação, elaborou-se um *brainstorming* do qual resultaram alguns pontos que a empresa gostaria de ver esclarecidos e ou analisados. Durante este procedimento foi fundamental os anos de experiência e o olhar crítico dos colaboradores da empresa.

O plano de testes realizado foi baseado no processo de produção. Para o efeito elaborou-se um plano de produção que respeitasse fielmente o existente, por forma a que as condições de fabrico habituais e respetivas conclusões fossem facilmente replicadas para acelerar o processo de melhoria da linha de produção. Note-se que todo o teste e abordagem foram concebidos por forma a que todos os ensaios realizados fossem não destrutivos para minimizar o custo do estudo.

A criação do teste foi um processo moroso, na medida em que as questões e dúvidas da empresa referentes ao processo nunca tinham sido abordadas num estudo deste tipo. Facto que forçou a conceção do estudo a abordar o maior número de questões possíveis dentro das requisitadas pela produção.

A abordagem consistiu em avaliar a linha de produção e todos os pontos de variabilidade do mesmo, anotando condições que dizem respeito aos operadores, ao tempo de produção, à idade do material e às máquinas de fabrico. Uma das bases do DOE é isolar

certas características para analisar as restantes, deste modo, o objetivo foi compreender o sistema para perceber qual seria a forma de fixar todas as variáveis (possíveis) visando isolar os ramos que seriam avaliados.

Utilizou-se o diagrama de Ishikawa para validar todos os pontos referidos acima.

O primeiro passo iniciou-se com a mira em dois ramos do diagrama, as máquinas e o meio ambiente, o objetivo é analisar o processo ao nível da capacidade,  $C_p$ . É uma ferramenta importante para averiguar o ponto onde se encontra o processo de produção, porém possui a dificuldade assente na recolha dos parâmetros,  $\mu$  e  $\sigma$ .

O segundo passo estipulado, que abrange o ramo das medições, consistiu em validar o sistema de medição para que se possa interpretar todas as medições nos gabaritos de dobragem e maquinação. Recorreu-se a um estudo R&R, neste caso ajustado ao processo e às possibilidades da empresa. Este estudo vai ser constituído por três operadores, com 5 peças e baseado em 3 repetições. Este método foi aplicado a ambos os processos, dobragem e maquinação. Os operadores escolhidos são experientes. Foi seguido todo o procedimento descrito em 2.2.3. A metodologia concebida no teste teve atenção sobre os pontos que deviam ser tidos em conta, deste modo, foram só escolhidos os pontos que rodeiam o cerne da dobragem, no eixo frontal e traseiro, abordando as duas actividades da linha de produção. Escolheu-se abordar os pontos P3, P4, P6, P14, P16 e P17 na atividade de dobragem e os pontos P8, P9, P10, P11, P14, P15 e P16 na atividade de maquinação.

O terceiro passo é parte integrante da abordagem ao teste alvo do caso de estudo. A conceção do teste tem início nas necessidades porém existem restrições, que devem ser devidamente analisadas.

A recolha da amostra tem de possuir material dos dois fornecedores, e sendo que o alumínio tem a condição de envelhecimento natural, como vimos em 3.1.2, é necessário recolher as amostras de dois contentores de extrusão que apresentem a mesma data de extrusão (máxima variação aceite, 2 dias de diferença entre fornecedores). Baseado nesta data surge a nossa variável mais importante, o tempo. Este é responsável por todo o agendamento e definição do teste, o  $T_0^9$  representa o instante inicial e é coincidente com a data de extrusão dos contentores.

O teste foi realizado ao longo de quatro semanas devido à característica que é apresentada pelos fabricantes das máquinas que aconselham que o alumínio deva ser trabalhado entre as três semanas e os três meses de vida. Por forma a responder às quatro semanas de duração do teste, foi necessário definir o tamanho da amostra que iria ser estudada. Assim definiu-se um valor de 20 perfis por fornecedor, por semana. Resultado que nos dará 40 amostras (20 Nava + 20 Sapa) semanais, que perfaz o total de 160 amostras ao fim do teste (80 N + 80 S).

Como já foi referido, toda a fabricação é baseada na geometria e no control da mesma. O teste é fundamentado em medições para a análise posterior.

Uma das maiores dificuldades durante o teste e análise do processo é referente ao

---

<sup>9</sup>T0 - Tempo 0 - Instante inicial

controlo realizado ao longo do decorrer do processo, não existe nenhum controlo que consiga ser repetido/constante desde o início até ao fim do processo.

Decidiu-se realizar medições de dureza visando perceber a evolução desta propriedade. Interessava provar que a amostra se encontra em  $AA\ 6060\ T_4$  estado apresentado pelo fornecedor, compreender a evolução deste estado ao nível do envelhecimento natural e averiguar no pós forno se a liga se encontra em  $T_6$  - justificando o envelhecimento até ao ponto esperado e necessário. Este procedimento é realizado com um alicate de dureza de *Webster*.

De forma a abordar estes objetivos, executou-se as medições em 3 pontos do processo ao longo do tempo, designados  $H_1$ ,  $H_2$  e  $H_3$ . A primeira medição,  $H_1$  é realizada em  $T_0$ , e envolveu as 160 (N+S) amostras, realizada na extremidade A. A segunda medição,  $H_2$ , é executada antes da dobragem, representando o início efetivo do processo, na extremidade B, ficando assim acoplada a cada uma das 40 (N+S) amostras que dão início ao esquema semana após semana. Implica que a 2ª, 3ª e 4ª medições resultem na evolução do estado puro relativamente à primeira medição com 1, 2 e 3 semanas de intervalo, respetivamente. A última medição,  $H_3$ , é realizada após a saída do forno e respetivo arrefecimento, na extremidade A e B. Com esta medição espera-se realizar uma análise de variância entre a 1ª e 2ª medição, ambas no estado puro e uma segunda análise de variância entre o estado puro e o material termo-endurecido. A Figura 3.5 ilustra o planeamento.

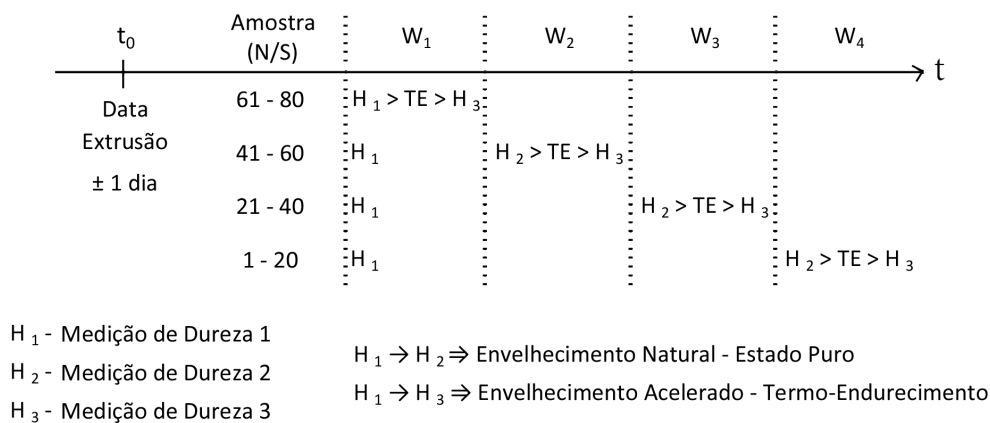


Figura 3.5: Planeamento Testes Dureza - N e S

O segundo alvo de medições será a dobragem. Sendo um dos processos em análise que importa fixar, é de notar que o programa de dobragem é sempre o mesmo ao longo das quatro semanas baseado numa peça do Forn.N. É o primeiro processo de definição geométrica, e a medição é realizada nos gabaritos de dobragem. Possui 2 momentos de avaliação, o primeiro assim que o material é dobrado e o segundo após o termo-endurecimento e respetivo arrefecimento. Espera-se compreender se existe algum desdobraimento por parte do material sendo que está sujeito a temperaturas elevadas e pode existir libertação de tensões que comprometam a geometria. A avaliação será executada por meio de uma

análise de variância a um fator, o tempo, para analisar como cada um dos materiais se comporta no estado puro, resultando assim uma *Anova* composta por [*Tempo vs Forn.N*] e [*Tempo vs Forn.S*]. Servirá ainda para uma análise de variância a dois fatores - o tempo e o termo endurecimento - resultando deste modo, [*Tempo vs Forno vs Forn.N*] e [*Tempo vs Forno vs Forn.S*]. Na Figura 3.6 apresenta-se o planeamento dos testes, tendo a Dobragem representada por D e a Medição Gabarito de Dobragem representado por \*<sub>1</sub>.

O terceiro e último alvo de análise será a maquinação. Sendo o segundo processo em análise que importa fixar, é de notar que o programa de maquinação é sempre o mesmo ao longo das quatro semanas, desde  $n_1 \rightarrow n_2$ . É o processo que confere aos perfis a geometria final. Esta análise será realizada no gabarito de maquinação. A primeira medição é executada assim que o material é maquinado. Existe ainda uma segunda medição que é realizada ao fornecedor que cede o material para pintura. A primeira e segunda medição de geometria é para a realização de uma análise de variância a um fator, e a dois fatores, respetivamente. Resultando assim *Anova* = Tempo vs Nava/Sapa e *Anova* = Tempo vs Pintura vs Nava. Na Figura 3.6 apresenta-se o planeamento dos testes, tendo a Maquinação representada por M e a Medição Gabarito de Maquinação representado por \*<sub>2</sub>.

A razão pela qual se executa este último teste prende-se com a necessidade de se compreender se a geometria se altera durante o processo de pintura. Este processo não é referido porque não é realizado na nossa empresa, é subcontratado, mas tem influência no nosso processo, daí a necessidade de avaliação e análise. O processo consiste na pintura a pó. Sendo que esta atividade tem na sua génese a aplicação de temperatura para que o mesmo seja desenvolvido, existe de novo a necessidade de percepção da libertação de tensões e compromisso da geometria final. Na Figura 3.6 apresenta-se o planeamento dos testes, tendo a Pintura representada por P e a Medição Gabarito de Maquinação representado por \*<sub>2</sub>.

Com todas as análises e motivos explícitos passamos agora à estrutura do teste. Como foi referido, o teste terá a duração de 4 semanas. Será um procedimento cíclico, começando no dia 1 de cada semana pela medição da dureza das 40 (20 N + 20 S) amostras semanais, pela dobragem e respetiva medição no gabarito de dobragem. O material fica em espera até que o forno se encontre disponível, função que é executada na madrugada do dia 2 da semana, após o forno, é necessário esperar pelo arrefecimento do material. Dia 3 executam-se as segundas medições, a dureza e a dobragem pós forno e o material avança para a maquinação. Dia 4 realizam-se as medições da geometria maquinada e o material do fornecedor N é ainda preparado para envio para a pintura e no regresso executam-se as medições pós pintura no gabarito de maquinação.

O planeamento tem início em T<sub>0</sub>, data de extrusão do alumínio, assim o T<sub>0</sub>+1 será a primeira semana de testes, cujas amostras constituintes são de  $i=80$  a  $i=61$ , para o Forn.N e Forn.S. Assim sucessivamente vem que, T<sub>0</sub>+2 possui [N41-N60 e S41-S60], T<sub>0</sub>+3 - [N41-N60 e S21-S40] e por fim T<sub>0</sub>+4 - [N1-N20 e S1-S20].

A Figura 3.6 ilustra o mapa de testes realizados, completo. O processo ilustrado foi o utilizado para ambos os fornecedores.

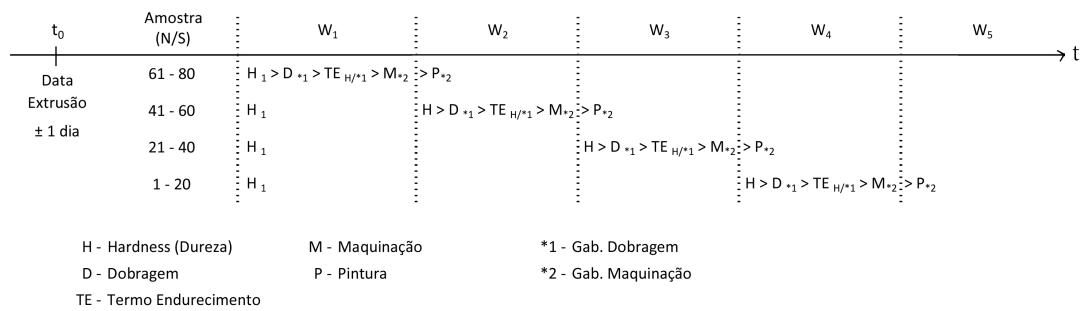


Figura 3.6: Planeamento Produção - Teste

Relembra-se o ponto fulcral, no início do teste na dobragem, como mencionado no sub-capítulo 3.1.3. Para se avaliar a evolução comportamental do material na reposta decidiu-se utilizar a força que estava definida no programa, aplicá-la à primeira amostra e executar o *record*. Daí em adiante, correu-se o programa da dobragem em *play* permitindo assim que as n-1 amostras restantes sofressem a dobragem cumprindo rigorosamente o alongamento encontrado no primeiro perfil.



## APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

A aplicação do planeamento de testes encontrou-se terminada e pronta a aplicar. Tendo em conta as noções retiradas do sub-capítulo 3.1.2, aliadas à experiência dos colaboradores, elaborou-se um esquema que pretende representar a evolução das semanas em função do declive da dobragem e da variabilidade apresentada pelo material. Deste modo, apresenta-se a figura 4.1, com os resultados esperados.









Semana	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$
Dobragem				
Dispersão				

Figura 4.1: Resultados Esperados do Envelhecimento do Material (Dobragem e Dispersão)

O resultado esperado quanto à dobragem apresenta em  $w_1$  uma curva bem acentuada resultado de um material macio, esta condição irá variando ao longo das semanas, atingindo  $w_4$  com uma curva pouco acentuada, ilustrando um material mais duro. Quanto à variação da dobragem, esperaria-se uma dispersão das amostras. Em  $w_1$  encontrar-se-ia uma dispersão que diminuiria até  $w_4$ , ilustrando deste modo, uma estabilização do material quanto ao seu envelhecimento natural.

Os resultados apresentam-se adiante.

## 4.1 Capacidade do Processo - $C_P$

A capacidade do processo representou o primeiro contacto com os dados.

A análise em causa exige uma definição dos parâmetros para uma análise fiável, o ideal seria recolher 100 amostras para estimar os parâmetros. Realizou-se esta análise para o ponto 14 da maquinaria para averiguar o processo. Foi possível recolher 80 amostras consecutivas no processo de fabrico, Figura dos dados no I. Com base nesta amostra estimou-se o parâmetro  $\sigma$ , apesar de serem 80 amostras, é possível considerar a aproximação viável.

Aplicando a equação 2.10, com limite superior e inferior de especificação =  $\pm 0,7$  ; calculou-se o  $C_P$ , apresentado na equação 4.1.

$$\sigma = 0,14 \implies C_P = 0,033 \quad (4.1)$$

Compara-se o resultado ao valor tabelado, visto em 2.5, como  $0,03 < 1,33$  declara-se que o processo não é capaz.

## 4.2 Dados Gerais - Teste

A amostragem torna-se o ponto fulcral do estudo, como tal, em seguida apresenta-se a distribuição das amostras recolhidas ao longo das quatro semanas do mês de Maio de 2019. A população no total é composta por 160 unidades. Na tabela 4.1 apresentam-se as amostras pelas semanas do teste. É de notar que a representação é referente a um dos fornecedores.

Tabela 4.1: Distribuição Amostras p/ Semana

Semana	Amostra do Contentor de Extrusão
w1	61 - 80
w2	41 - 60
w3	21 - 40
w4	01 - 20

A w1 representa a primeira semana de vida do material, ou seja  $[T0 + 7dias]$ , e está representado pela amostra que está numerada da peça [61-80]. A w2, w3, w4 ilustram-nos o material com duas  $[T0 + 14dias]$ , três  $[T0 + 21dias]$  e quatro  $[T0 + 28dias]$  semanas de vida, respetivamente.

Após a finalização do estudo R&R e das quatro semanas de teste ao processo completou-se a recolha amostral completa, nesta fase foi necessário utilizar um programa capaz de tratar os dados. O programa escolhido foi o *Statistica*, que permitiu a realização dos estudos R&R e das análises de variância a um e a dois fatores.

### 4.3 Estudo R&R

O estudo *R&R* é um dos mais importantes, tornando a medição dos dados válida, conferindo estrutura e base ao estudo.

Começou-se por avaliar o gabarito da dobragem, os três operadores realizaram três medições de cada uma das cinco peças escolhidas. Os pontos do gabarito que foram escolhidos representam a curva de dobragem. Deste modo e respeitando ambas as curvas que a peça possui escolheram-se os pontos *P1*, *P3*, *P4*, *P6* no eixo frontal e os pontos *P14*, *P16*, *P17* no eixo traseiro. Uma vez que os pontos se encontram indicados, procedeu-se às medições para a elaboração do estudo *R&R*. O resultado porém não foi o esperado.

Como foi referido anteriormente a avaliação deste estudo é realizada através da percentagem da variação total. Para o sistema estar apto a realizar medições teria de apresentar um valor que estivesse compreendido entre 0% e 10%. Verifique-se o resumo dos valores apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Quadro Resumo Estudo *R%R*

Ponto do Gabarito	Resposta R&R(%VT)
P3	92,5
P4	94,5
P6	91,3
P14	93,1
P16	92,4
P17	96,2

Como se pode observar na tabela, as respostas apresentadas pelo sistema de medição encontram-se numa gama de valores que ronda os 90%, o que significa que o sistema não está apto a realizar medições para a especificação a que se encontra proposto.

A razão pela qual existe esta ordem de valores tão elevada por parte da percentagem da variação total do *R&R* prende-se com o facto de que a percentagem de variação do valor *Peça a Peça* apresentado é muito baixo, o que significa que a variação entre as peças é muito pequena e não permite que o sistema de medição alcance uma variação tão curta, imputando a variação aos restantes intervenientes, variação do equipamento ou variação do operador. Por outras palavras, significaria que o alcance do instrumento teria de ser muito mais profundo.

No anexo I, estão figuras com os valores percentuais das variações peça a peça.

Homologamente ao gabarito da dobragem, também o gabarito da maquinação foi alvo de análise do estudo *R&R*. Deste modo, os pontos de avaliação escolhidos foram novamente os que se encontram nas zonas curvas da peça, não só pelo conceito do estudo mas também pelo paralelismo das medições que existem entre os gabaritos do primeiro e do segundo processo. Existe porém uma diferença neste caso. Apesar do declive da curva

estar igualmente presente, o gabarito de medição foi concebido para medir a zona da peça que foi maquinada, ou seja para medir a geometria final da peça. Repare-se agora no resumo do estudo *R&R* realizado ao sistema de medição da maquinação, na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Quadro Resumo Estudo *R%R*

Ponto do Gabarito	Resposta <i>R&amp;R</i> (% <i>VT</i> )
P8	89,9
P9	95,6
P10	95,4
P11	67,8
P14	92,2
P15	88,0
P16	83,7

O quadro reflete os dados do estudo, consequentes das medições realizadas pelos operadores, existe uma gama que apresenta valores compreendidos entre 67% e 96%. Recorrendo ao critério de aceitação de um instrumento de medição, este representa o espectro não aceitável. Analisando ainda o quadro da percentagem da variação total revê-se novamente a pequena variação existente na alínea peça a peça, ou seja, para o sistema ter capacidade de alcançar tal variação teria que ser mais sensível, assim como no estudo *R&R* da dobragem, repara-se que o erro da medição fica associado à variação do equipamento ou do operador. No anexo I, estão figuras com os valores percentuais das variações peça a peça para consulta.

#### 4.4 Análise Dureza

A análise de dureza foi avaliada com um alicate de Webster, recordando, foi definido que estas medições seriam executadas à chegada do material marcando o registo temporal - *H1* - em seguida, antes da dobragem - *H2* - e por fim, à saída do forno - *H3*. Desta forma esperaria-se encontrar uma representação do envelhecimento a temperatura ambiente e do envelhecimento acelerado do material.

Os resultados da dureza foram inconclusivos em *H1* e *H2*, não existe comportamento homogéneo dos dados que possibilite o estudo, invalidando assim as noções que resultariam da análise de variância durante o estado puro do material e posterior envelhecimento induzido, só se verifica uma gama de valores dentro do esperado estado - *T4*.

A gama de valores mantém-se ao longo das quatro semanas. No estado natural, varia entre os 2-6 Webster em ambos os fornecedores, o que significa que o material possuirá condição semelhante e que os fornecedores estão a respeitar a entrega do material em estado *T4*.

Ao nível da recolha da medição em *H3*, consegue notar-se um padrão na gama mais elevada de dureza, como era esperado, a figura 4.2 ilustra os níveis resultantes das medições realizadas ao alumínio com tratamento térmico.

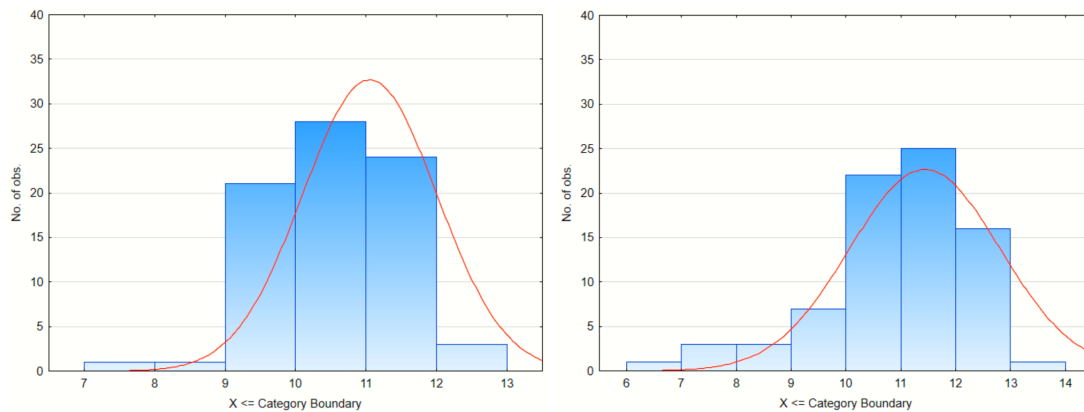


Figura 4.2: Resultados Dureza - Pós Termo Endurecimento - Forn.N e Forn.S

Os histogramas apresentados nas figuras ilustram, no fornecedor S uma distribuição mais achatada, apresentando valores que abrangem um maior intervalo de durezas. O fornecedor N apresenta uma distribuição mais concentrada acentuada na gama de valores entre 9 e 12 [web]. Esta gama de valores encontra-se dentro do estado *T6*, logo, cumpre-se o estado requisitado pelo cliente.

## 4.5 Processo - Dobragem

### Análise de Variância - Análise a um Fator - Tempo

Em relação ao estudo da dobragem utilizaremos a análise de variância. Começaremos pela análise a um fator, o tempo, e iremos avaliar os dois fornecedores individualmente. Para isso, utilizou-se os dados recolhidos após a dobragem em cada uma das semanas.

No plano de testes referido, os dados foram recolhidos através do sistema de medição da empresa, gabaritos e relógios comparador. Apesar do estudo *R&R* ter revelado que o sistema de medição não é o mais indicado, o estudo manteve-se devido ao facto de este sistema de medição ser o utilizado pelos operadores. Assim confere-se uma noção aprimorada do instrumento de medição. No desenlace desta necessidade, todas as medições foram realizadas pelo mesmo operador, que executou as medições utilizando constantemente o mesmo modo de procedimento para minimizar a variação derivada do sistema de medição. Complementando esta atenção acrescida do operador, os dados serão devidamente analisados quando realizada a análise de variância, com a verificação da normalidade, independência dos dados e a análise de resíduos.

A dobragem no caso de estudo é um tema indefinido, pouco exato. A dobragem convencional é realizada somente num eixo, o que significa que o resultado apresentado é linear, todo o material ao longo da curva encontra-se à mesma distância. Ou seja, uma medição

ao perímetro interno da curva do lado esquerdo e do lado direito da peça é semelhante no início e no fim da dobragem linear convencional. O processo apresentado implica uma dobragem em 3 eixos com rotação. Uma nova medição realizada no exemplo indicaria um perímetro interno da curva do lado esquerdo da peça diferente do perímetro apresentado no perímetro interno lado direito da mesma. Existe um alongamento diferente dentro da peça intrínseca à geometria desejada.

Na concepção do estudo definiu-se então que todos os pontos fulcrais seriam os que descreveriam a curva. Deste modo, a medição será a distância que se encontra entre o gabarito de medição e o ponto de contacto do relógio comparador com a peça.

A ideia principal do estudo e de todas as análises consequenciais, sejam estas referentes à zona frontal ou traseira de cada um dos perfis, consiste em encontrar um comportamento comum apresentado pelas peças, como se de planos de inclinação se tratasse, que definissem a curvatura de cada uma das peças. Assim, são escolhidos três ou quatro pontos medidos nos gabaritos, considerados fulcrais, para que seja possível avaliar a dobra da forma mais completa. Naturalmente que a análise perfeita será as peças estarem dobradas colinearmente com a nominal do gabarito. Esta, apresenta cota 0 e visualmente corresponde à idealização perfeita que o cliente terá desejado para a geometria final, que é representada fielmente no programa virtual.

O referencial da indústria automóvel define-se do lugar do condutor, sendo que o eixo do XX's tem o sentido positivo para a frente do condutor, o eixo do YY's possui o sentido positivo da esquerda para a direita e o eixo dos ZZ's aplica o sentido positivo do asfalto ao tejadilho da viatura. O sistema de medição da fábrica deveria estar de acordo com o consenso explicitado, porém encontra-se invertido na dimensão dos ZZ's. Isto significa que a escala numérica crescente é inversamente proporcional à dobragem, ou seja, uma medição positiva espelha um perfil mais dobrado em relação a uma medição negativa. Especificamente, a nominal é nula, o limite superior e inferior de especificação são 0,7 e -0,7, respetivamente.

Quando a barra é colocada na viatura, o valor positivo vai apresentar uma peça onde a extremidade está em contacto com o tejadilho da nossa viatura, isto é, uma peça demasiado dobrada. O valor negativo, significa que a peça está demasiado elevada, isto é, a peça ficou pouco dobrada. Este referencial vigora em todas as atividades e medições do processo existente na fábrica. A figura 4.3 possui a representação dos referenciais para facilitar a interpretação dos dados e visualização de toda a conotação da problemática.

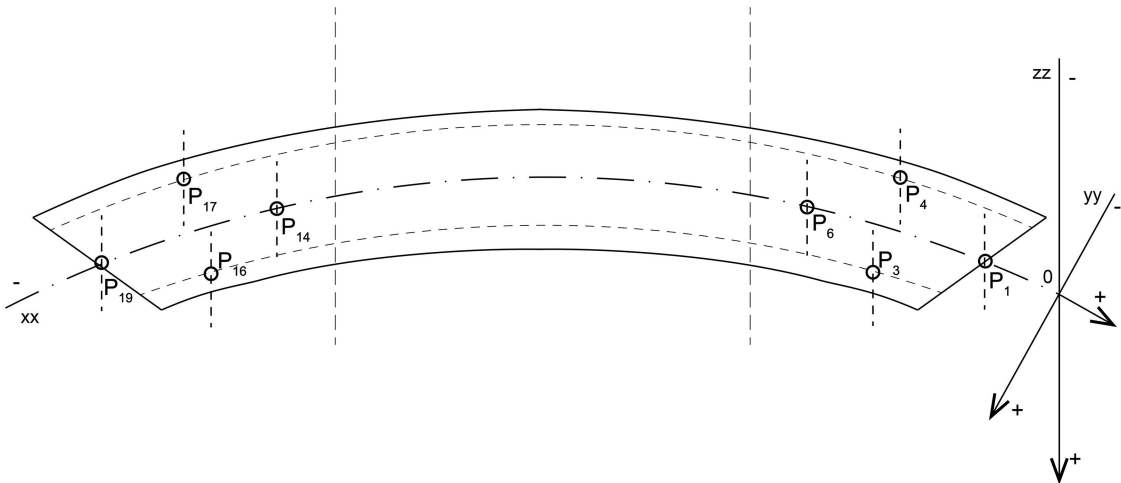


Figura 4.3: Perfil e Pontos Analizados (representativo)

A One Way *Anova* da dobragem avalia os dois fornecedores individualmente com o tempo como fator principal.

Primeiro analisou-se o eixo frontal da dobragem, com os pontos *P3*, *P4* e *P6* do material N, figura 4.4.

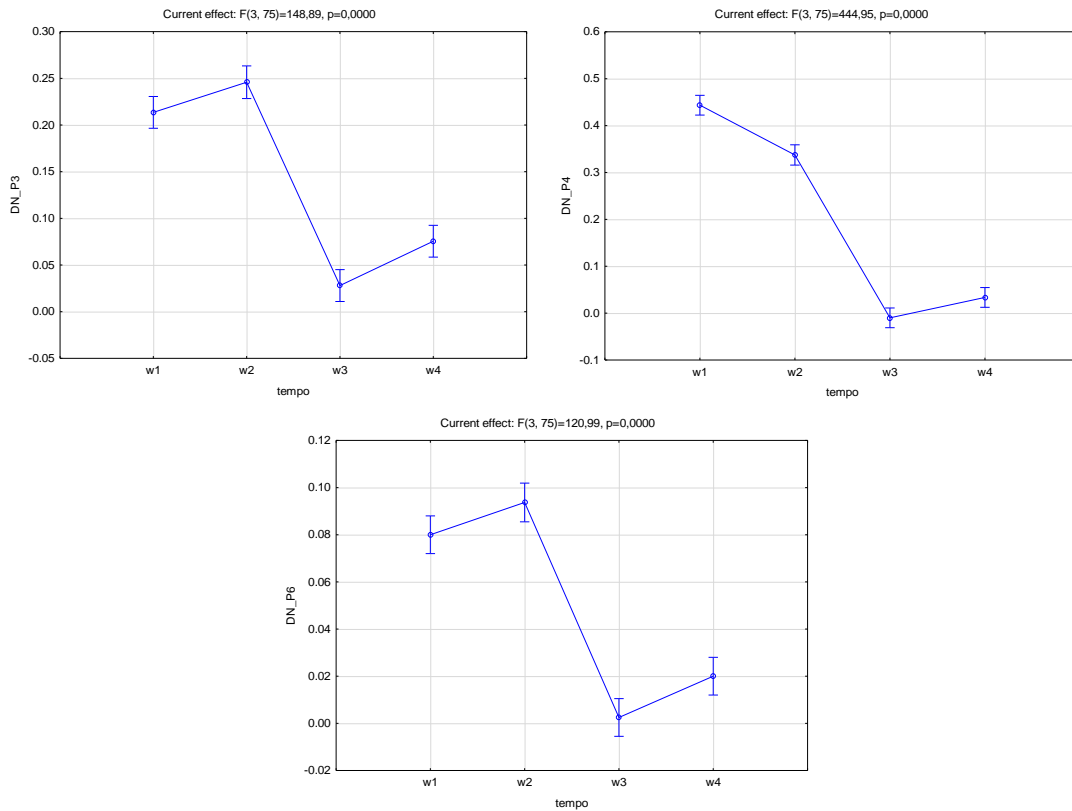


Figura 4.4: Dobragem - Eixo Frontal - Fornecedor N - P3, P4, P6

Observa-se as figuras representativas dos dados recolhidos após o processo de dobragem ao longo das quatro semanas de teste. Cada um dos pontos representados no gráfico representa a média e a dispersão apresentada de cada uma das amostras recolhidas ao longo das 4 semanas. É de notar que os dados foram analisados, quanto à normalidade, independência e significância - avaliada pelo valor do *p-value* que se encontra em cima de cada uma das figuras.

As sub-figuras apresentam no referencial das abcissas o tempo - representado por cada uma das semanas, o *w* é ilustrativo de '*week - semana*' (note-se que a letra S já representava um dos fornecedores). O referencial das ordenadas possui um código - a primeira letra representa o processo que estamos a analisar, a segunda letra ilustra o fornecedor e por último, a letra e o número caracterizam o ponto da curva que está a ser averiguado. Por exemplo, no primeira sub-figura: [Dobragem, Fornecedor N, Ponto 3]

Quanto à análise, verifica-se intuitivamente que a dispersão existente em cada uma das sub figuras é constante ao longo dos quatro pontos *w*, mostrando assim que a variabilidade não se altera ao longo do tempo. Relativamente às médias, repara-se que existem dois grupos distintos, o *w1* e o *w2* formam um grupo, e o *w3* e *w4* formam outro. Esta diferença está representada essencialmente no declive apresentado pela reta que une os pontos *w2* e *w3*. Significa que a máquina de dobragem encontra duas resistências diferentes e ou o regime elástico plástico do material difere.

A máquina de dobragem força o perfil horizontal à matriz curva, e o modo como o faz é exemplar, quer isto dizer, que desde a posição inicial até à posição final da dobragem a máquina dobra sempre até ao mesmo lugar físico para onde o código do programa está definido. Assim, repare-se que a dureza aliada ao regime elástico-plástico contribuem para as diferenças encontradas entre cada perfil de alumínio ou cada contentor de extrusão.

Deste modo, cada perfil vai apresentar a resposta que o regime elástico-plástico produzir quando a máquina alivia a pressão que estava a realizar durante o trajeto da dobragem.

Voltando à análise da figura efectiva, observando DN - P3 - percebe-se que o *w1* e *w2* apresentam uma média que ronda os 0,25 mm, isto significa que, no mínimo, a máquina está a forçar o material à dobragem a 0,27 mm, extremo da dispersão do ponto *w2*, como se sabe que existe recuperação elástica, pode ainda afirmar-se que a máquina dobra além dos 0,27 mm.

Em relação ao envelhecimento natural sabe-se que o material endurece ao longo do tempo. Neste ponto existe uma condição mais baixa na semana 1 e 2 porque um material mais macio apresenta um regime elástico menor. Já a semana 3 e 4 nota-se o material algo mais duro, sendo que a média apresentada aproxima-se dos 0,05 mm de dobragem e como o valor é numericamente inferior à média da semana 1 e 2 sabe-se que as peças estão menos dobradas. Esta diferença pode ser resultante da resistência do material à dobragem e ou do regime elástico estar a aumentar devido ao envelhecimento natural do alumínio.

Relembra-se que a amostra é parte integrante do mesmo contentor de extrusão e ao longo de todo o processo de dobragem é utilizado o mesmo programa, o que significa

que se o material fosse todo o mesmo o gráfico apresentaria uma linha reta paralela ao eixo das abcissas. Nota-se a diferença do tempo no material, existe uma dobragem mais acentuada ao nível das semana 1 e 2 e uma dobragem mais subtil na semanas 3 e 4.

Apresenta-se em seguida o primeiro contacto com o fornecedor S, figura 4.5.

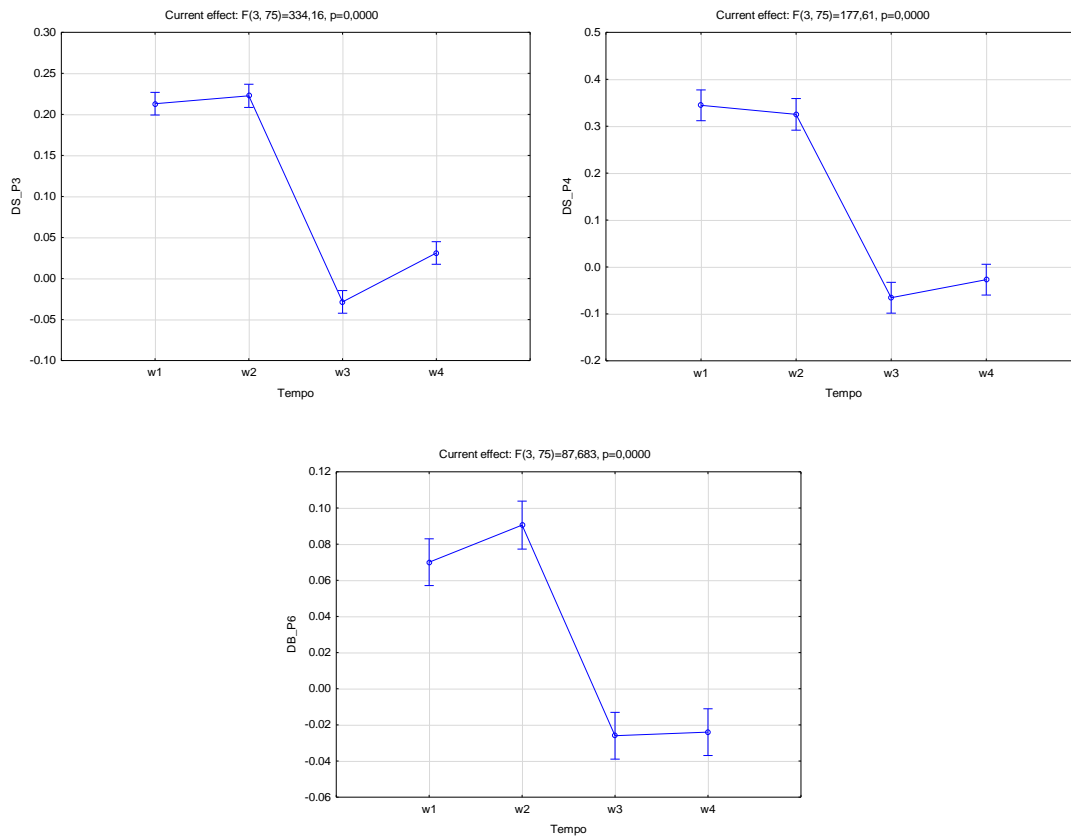


Figura 4.5: Gráficos da Dobragem - Eixo Frontal - Fornecedor S - P3, P4, P6

Procede-se à análise dos gráficos da dobragem. Observando os eixos, encontra-se o tempo representado pelas quatro semanas num referencial e o código no outro, homologicamente ao primeiro código [*Dobragem, Fornecedor S, Ponto 4*]<sup>1</sup> convergindo assim em *DS\_P3*. Pode reparar-se que existe de novo semelhanças entre as semanas 1, 2 e 3, 4, ao nível das médias. Ao nível da dispersão, pode perceber-se que em cada um dos gráficos esta se mantém de novo, ou seja não existe diferença de variabilidade ao longo das semanas. Agora que já existe o primeiro fornecedor analisado, pode retirar-se ainda notas de que o comportamento de ambas as ligas é semelhante.

De seguida, iniciou-se a observação dos dados relativamente à dobragem ao nível do eixo traseiro das peças, figura 4.6.

<sup>1</sup>Esta notação será utilizado ao longo do documento.

## CAPÍTULO 4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

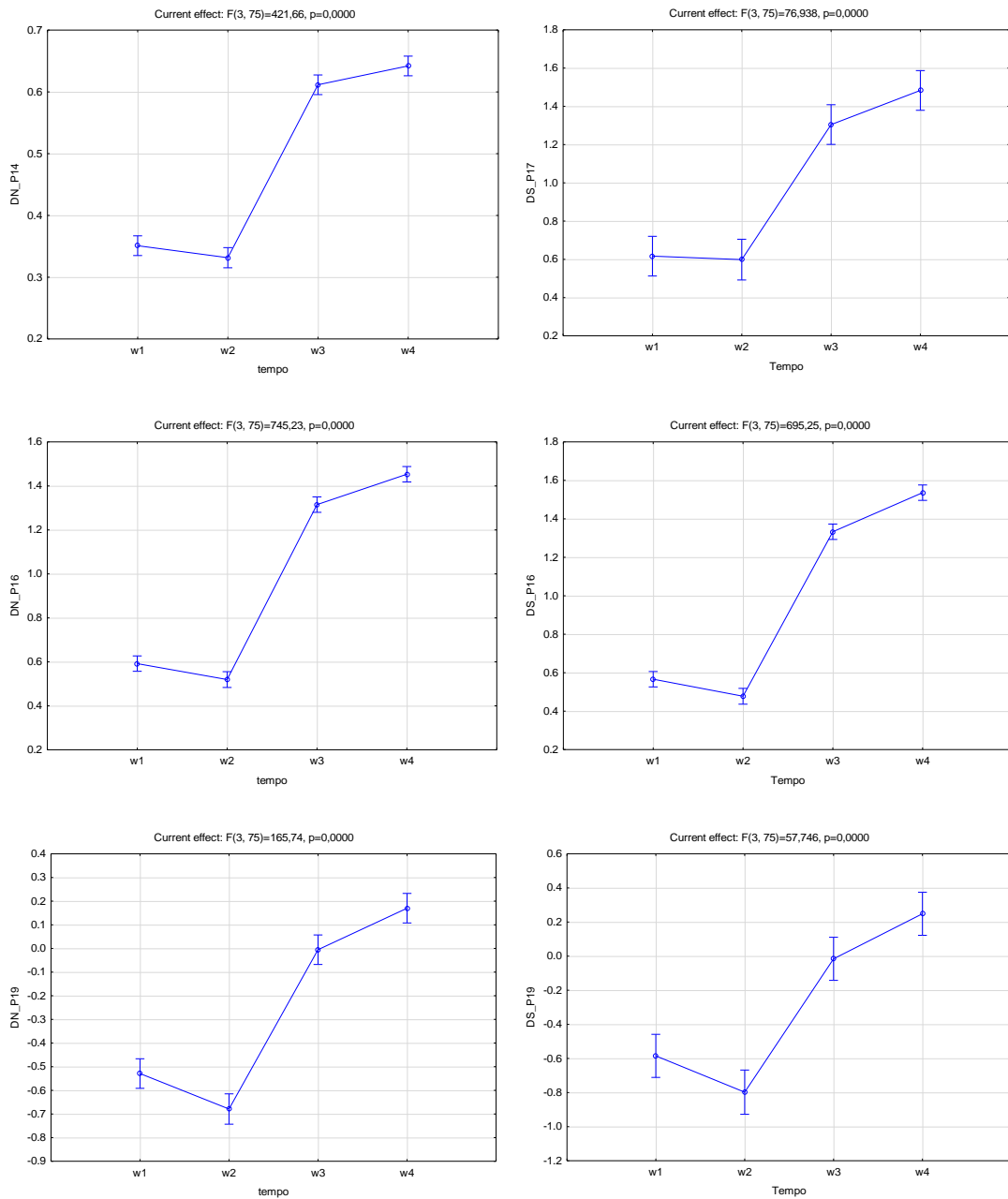


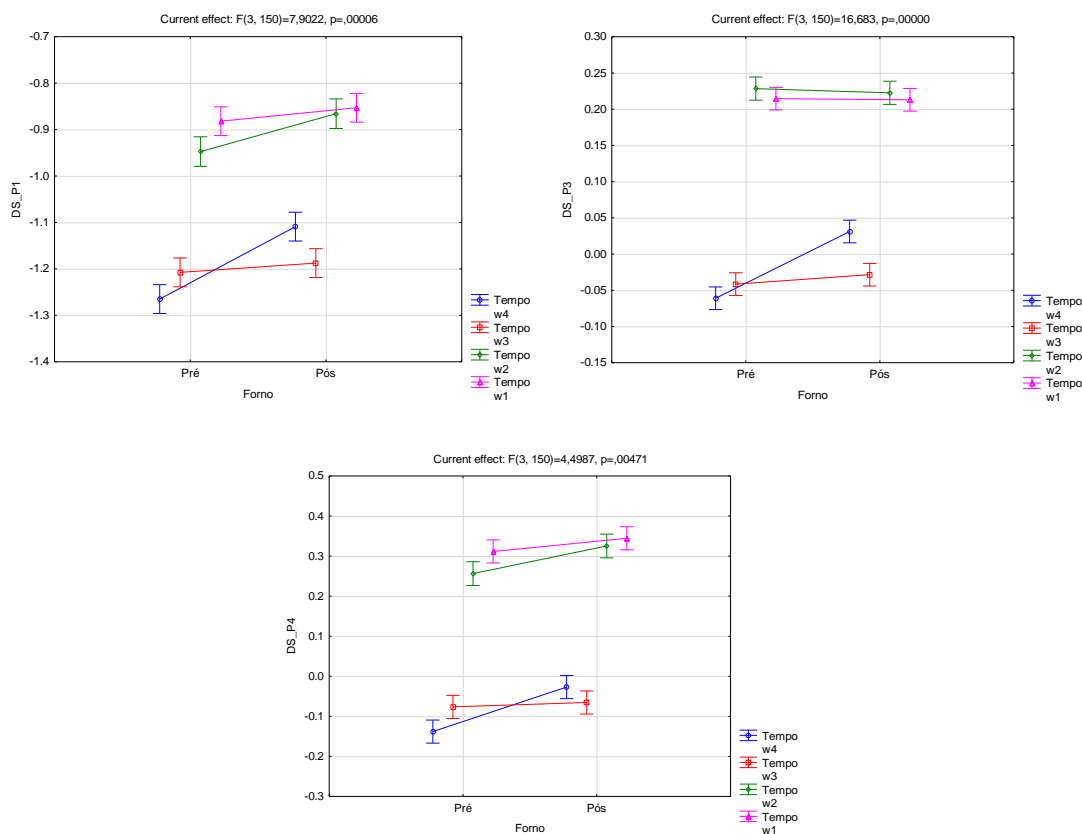
Figura 4.6: Dobragem - Eixo Traseiro - Fornecedor N (Esquerda), S (Direita) - P14, P16, P17, P19

Existe uma ligeira diferença, essencialmente, no comportamento do material, o padrão aparece invertido, o que revela um comportamento físico esperado mas não ideal. Estes valores são resultado das tensões aplicadas nas peças para forçar a dobragem, é um equilíbrio, se no eixo frontal ela toma um comportamento devido às tensões, no eixo traseiro vai aparecer o comportamento inverso. Este estudo não permite analisar este detalhe.

## 4.6 Processo - Termo Endurecimento

iniciou-se o próximo processo, o termo endurecimento, como relatado anteriormente, as peças encaminham-se para o forno logo após a dobragem e são recolhidas após as 12h do processo estarem completas. Como a geometria física não se altera, as peças foram novamente medidas no gabarito de dobragem para analisar a geometria da dobragem. Com estes dados realizou-se uma análise de variância a dois fatores - o tempo e o forno. Aferiu-se deste modo se existe algum dos materiais que tem mais propensão a soltar as tensões aplicadas às peças no processo de dobragem de forma a comprometer a geometria desejada.

Os dados recolhidos foram inseridos no *Statistica*, e o processo no programa passa por abrir o menu *Statistics* > escolher a opção *Anova* > o tipo de análise *Main effects Anova* > denominando as *Variables*, dependentes e independentes > por fim utiliza-se *All effects/ Graphs*. Em seguida apresenta-se os resultados, Fornecedor S, eixo frontal e Traseiro, figura 4.7.



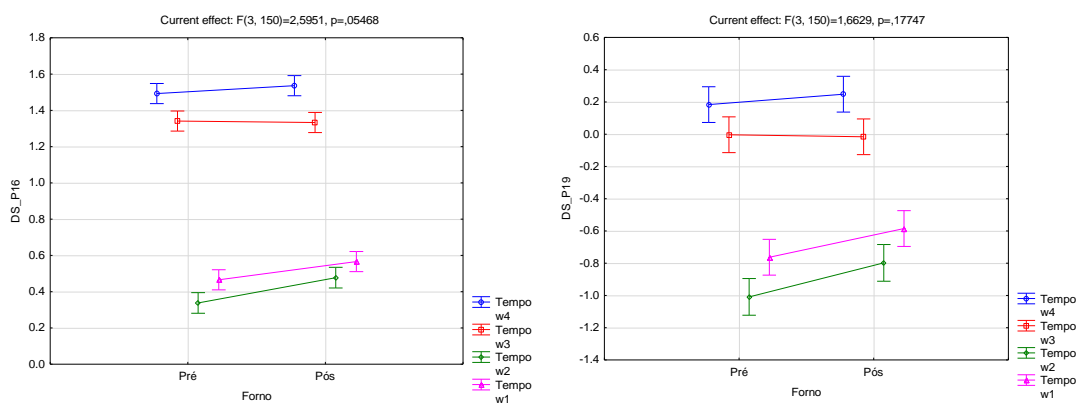


Figura 4.7: Dobragem - Pré e Pós Forno - Fornecedor S - Eixo Frontal (P1, P3, P4) - Eixo Traseiro (P16, P19)

Os resultados esperados por parte da empresa apontariam para um processo fiável e invariável. As figuras espelham os resultados do estudo e uma ligeira diferença relativamente ao que se esperaria. Reparou-se que a temperatura que o forno atinge para realizar o envelhecimento acelerado provoca uma alteração na geometria da peça, significa que existe algum alívio das tensões aplicadas na dobragem.

Analisaram-se as figuras atentamente e pôde verificar-se que o material apresenta variações de uma décima entre as medidas recolhidas no pré e pós forno, a variação é no sentido esperado, ou seja, existe uma desdobragem, notada nas semanas  $w1$ ,  $w2$ ,  $w4$ . A  $w3$  apresenta um comportamento diferente das outras semanas, é constante ao longo dos pontos analisados da peça e demonstra capacidade de manter a geometria que possui à entrada do forno e preservá-la até ao fim do mesmo.

De notar que os dados só são significativos ao nível do  $p$ -value nas três primeiras sub-figuras apresentadas na figura 4.7.

Posteriormente, inseriram-se as medições do fornecedor N nas folhas de dados do programa *Statistica*, e realizou-se exatamente o mesmo procedimento, de onde resultou a figura que está apresentada de seguida.

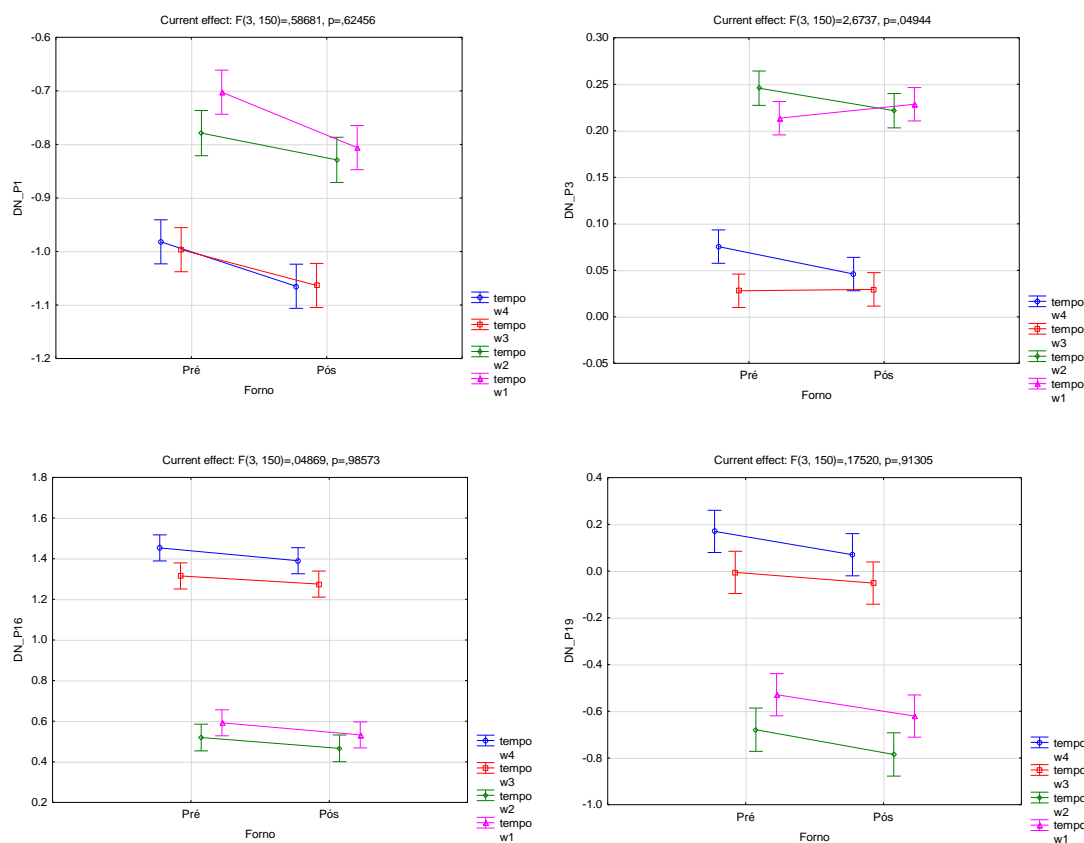


Figura 4.8: Dobragem - Pré e Pós Forno - Fornecedor N - Eixo Frontal (P1, P3) e Traseiro (P16, P19)

O Material N apresentou um comportamento inesperado durante a atividade do termo endurecimento, mas analisando o *p-value* verifica-se que os dados não são significativos, logo não se considera esta análise válida.

## 4.7 Processo - Maquinação e Pintura

Por fim, a maquinação, é o último processo da linha de produção do caso de estudo e é responsável por conferir à peça a sua geometria final.

A maquinação recebe os perfis que saíram do forno, existindo um tempo de arrefecimento necessário, é importante que a temperatura do material esteja à temperatura da máquina para a execução do processo, ambas à temperatura ambiente neste estudo de caso. Como visto em 3.1.3, o material possui um estado T6 e encontra-se devidamente pronto para o início da produção da geometria final.

Ao longo das quatro semanas, o material foi maquinado após a atividade de termo endurecimento e foi alvo de inspeção no gabarito de maquinação. Das inspeções sequenciais resultaram uma série de dados que foram utilizados para as análises desenvolvidas em seguida.

A figura que se apresenta em 4.9, ilustra os pontos que serão analisados neste processo, tem o objetivo de facilitar a interpretação, principalmente ao nível dos referenciais.

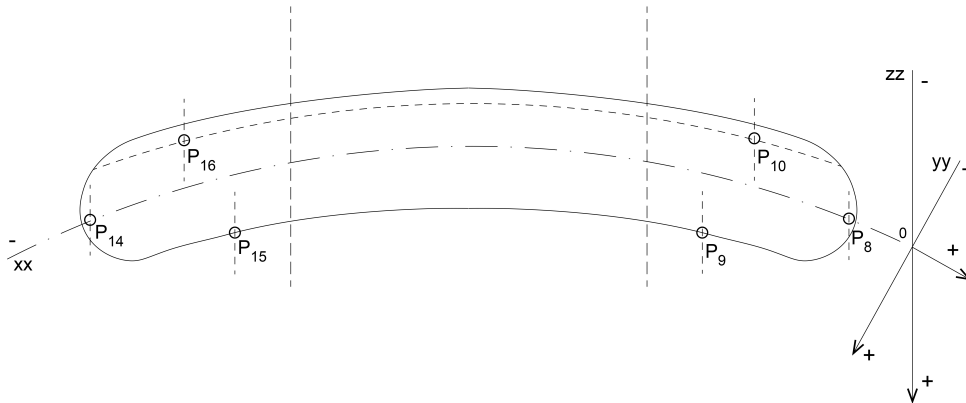
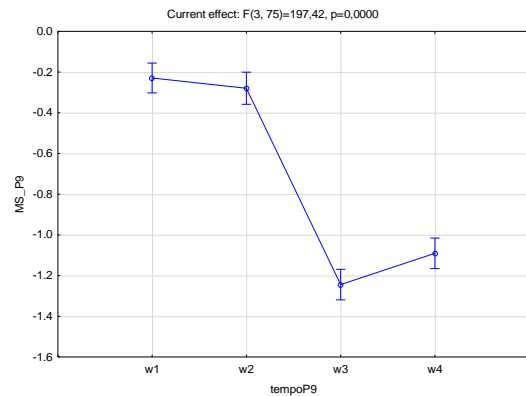
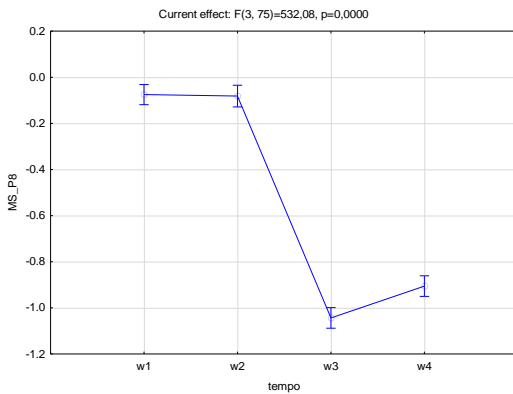


Figura 4.9: Perfil e Pontos Analizados - Maquinação (representativo)

Os dados foram introduzidos e organizados em registo informático, por fornecedor e por semanas, e inseridos no *Statistica* para realizar o tratamento dos mesmos, o processo no programa passa por abrir o menu *Statistics* > escolher a opção *Anova* > o tipo de análise *Main effects Anova* > denominando as *Variables*, dependentes e independentes > por fim utiliza-se *All effects/ Graphs*. As figuras seguintes ilustram o resultado do programa. iniciou-se a análise no fornecedor S, eixo frontal e traseiro.



#### 4.7. PROCESSO - MAQUINAÇÃO E PINTURA

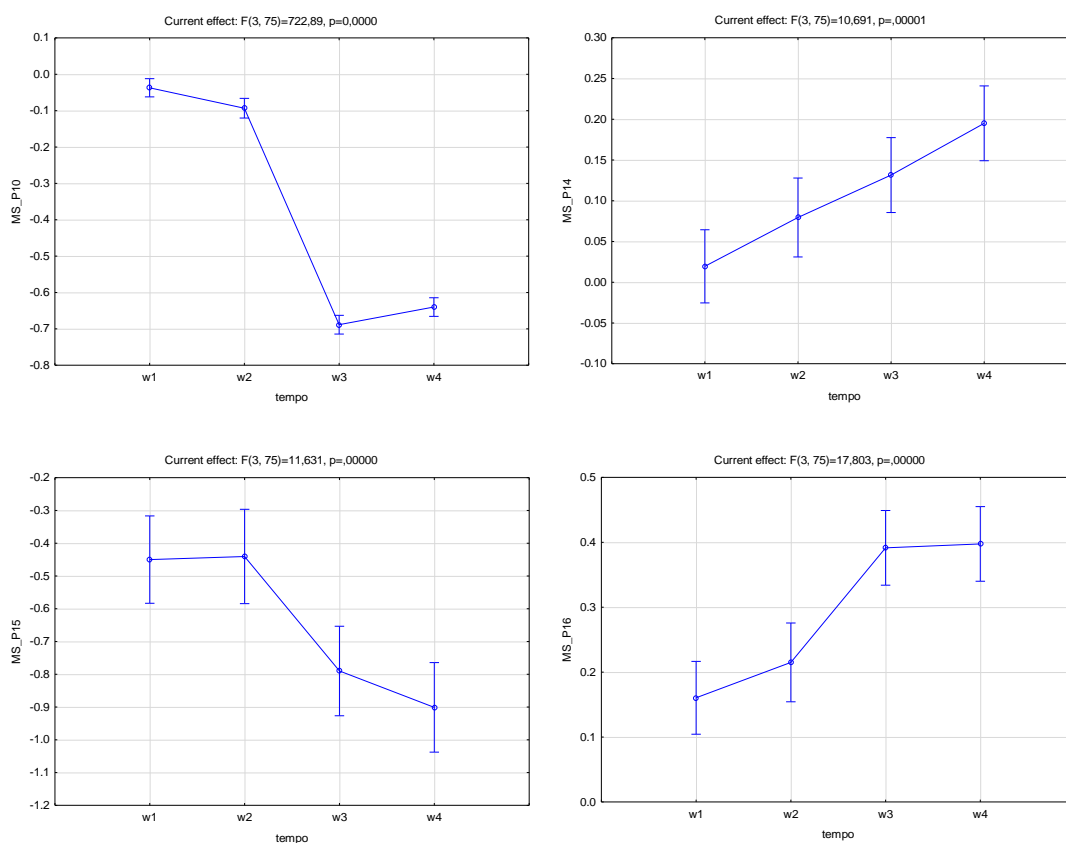


Figura 4.10: Maquinação - Fornecedor S - Eixo Frontal (P8, P9, P10) - Eixo Traseiro (P14, P15, P16)

A figura apresenta seis subfiguras representando os seis pontos que foram alvo de análise. O referencial das abcissas apresenta o tempo e o referencial das ordenadas a resposta resultante de cada lote, apresentando assim a sua média e a variabilidade.

Analisaram-se as três sub figuras que representam o eixo frontal da geometria resultante da maquinação e apresentam um  $p$ -value de  $\approx 0$  - assegurou-se assim que as medições são significativas. Existem dois grupos distintos como é notado desde a dobragem, a  $w1$  e a  $w2$  formam o primeiro, e a  $w3$  e  $w4$  formam o segundo. Primeiramente, pode afirmar-se que nas três sub figuras a dispersão que se apresenta ao longo das quatro semanas é constante e que não existe nenhuma diminuição por parte da variabilidade do material ao longo do tempo. Quanto à condição do material em  $w1$  e  $w2$ , o programa consegue produzir na cota nominal representando precisão, apresentando valores entre a cota  $-0,05$  (em  $MS_{P10}$ ) até  $-0,3$  (em  $MS_{P9}$ ) demonstrando que o plano da curva é consistente. Na semana  $w3$  e  $w4$ , existe um comportamento novamente coerente entre as três primeiras sub figuras e apesar do desvio referente ao centro do processo de produção, representada pela cota  $0$ , a variação apresentada pelos três pontos individualmente entre as duas últimas semanas varia 2 décimas.

Reforçou-se o conceito de que o material varia, novamente marcado pelo declive apresentado entre a semana  $w2$  e  $w3$ . A reação do material estará influenciada neste ponto, pela dobragem e pela condição naturalmente intrínseca, para além destas noções, notou-se anteriormente que a máquina quando prepara o início do processo executa a grampagem dos perfis levando-os ao centro do referencial sobre o qual a máquina está orientada, este facto implica que a dobra que o material possui realizada na atividade de dobragem, reforçada ou não, no termo endurecimento, é neutralizada para a cota de dobragem que o eixo da máquina tem definido.

Analisou-se à *posteriori* os dados apresentados pelo eixo traseiro, representado nas três últimas sub figuras em 4.10. Os resultados apresentados são incoerentes, encontra-se aqui uma divisão de resultados. A consequência dos resultados apresentados na dobragem no eixo traseiro, 4.6 - todos os pontos apresentavam o mesmo comportamento - deveria existir uma coerência semelhante nos resultados apresentados na maquinação, porém o resultado é diferente, sendo que o *MS\_P15* corrobora a avaliação realizada no eixo frontal dos perfis, isto porque a semana  $w1$  e  $w2$  apresentam perfis com uma dobra mais acentuada, ou seja, mais junto ao tejadilho da viatura, enquanto a semana  $w3$  e  $w4$  espelham uma dobra menos acentuada.

Referente às subfiguras *MS\_P14* e *MS\_P17* aparecem novamente com a dureza a diminuir ao longo do tempo, como anteriormente, foi apresentado nos resultados da dobragem. Deste modo, tratou-se de se achar resposta à anormalidade do caso

Refletiu-se efectivamente sobre o que estaria a acontecer com os dados e o significado dos mesmos. Como referido anteriormente, a recolha dos dados foi toda executada na mesma altura, posterior a cada um dos processos e realizada pelo operador sempre do mesmo modo. As medições do gabarito de maquinação resultam da medição do local onde a serra e a fresa maquinaram, a máquina quando inicia o processo força a peça à posição neutra para o processo decorrer dentro da normalidade, daí todas as peças sofrerem o mesmo impacto da mesma forma e a diferença comportamental entre o ponto *MS\_P15* e os pontos *MS\_P14* e *MS\_P17* resulta da dobragem criada na matriz inicial devido aos eixos de curvatura e evidencia-se neste ponto devido ao corte de material do perfil, onde as forças resultantes reagem deste modo à maquinação.

Em seguida, apresentam-se os resultados do *Statistica* para o fornecedor N, figura 4.11.

## 4.7. PROCESSO - MAQUINAÇÃO E PINTURA

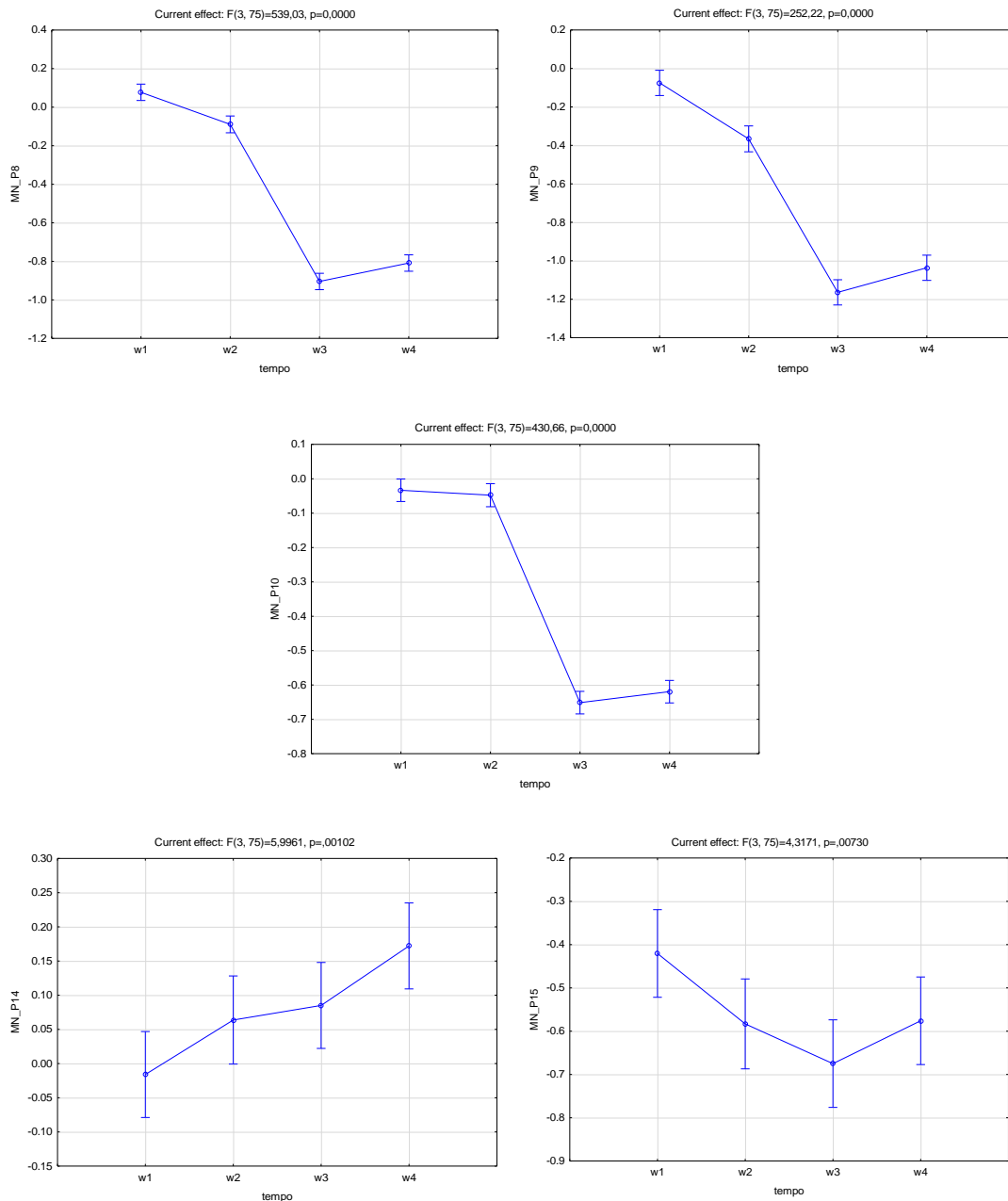


Figura 4.11: Maquinação - Fornecedor N - Eixo Frontal (P8, P9, P10) - Eixo Traseiro (P14, P15)

Analisou-se o fornecedor N quanto à sua prestação no processo de maquinação ao longo das quatro semanas e ao longo de alguns pontos espalhados ao longo de cada um dos perfis. iniciou-se a aferição comportamental no eixo frontal e em seguida no eixo traseiro.

A sequência espelhada nas três primeiras sub-figuras é já reconhecível, o comportamento do material apresenta homogeneidade entre os diferentes pontos. Os dados

marcam novamente o declive encontrado entre as duas primeiras e últimas semanas, cujos valores das médias apuradas das duas primeiras semanas se localizam em redor da nominal da medição. A dispersão apresentada ao longo das semanas em cada uma das sub-figuras é constante, o que significa que o comportamento variável do material não se expressa neste tipo de análise como se esperaria. O *p-value* valida a significância dos dados.

O eixo traseiro apresentou uma divergência semelhante à apresentada no material do fornecedor S, o ponto *MS\_P15* destacou-se do ponto *MS\_P14* e da generalidade do comportamento que até aqui estaria a ser apresentado desde a dobragem.

Através dos dados recolhidos tornou-se ainda possível realizar uma análise de variância a dois fatores, utilizando o tempo e os fornecedores como variáveis independentes. Esta análise facilita a avaliação dos dois fornecedores e quanto à sua interação e prestação perante o mesmo programa.

A análise foi executada com o auxílio de um programa informático, onde se procedeu do seguinte modo: inseriu-se os dados recolhidos no *Statistica*, abriu-se o menu *Statistics > escolheu-se a opção Anova>* o tipo de análise *fatorial Anova > denominou-se as Variables, dependentes e independentes >* e por fim utilizou-se *All effects/ Graphs*. A figura 4.12 em diante ilustrou o resultado do programa para o eixo frontal do processo de maquinação.

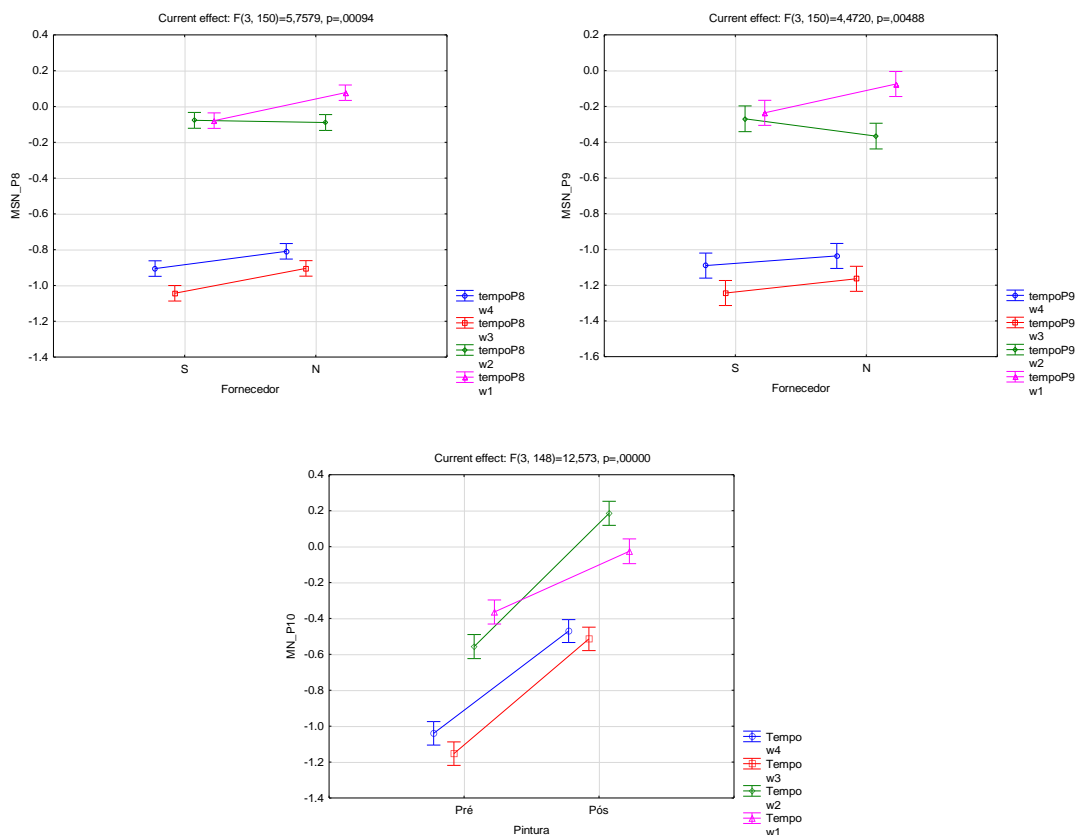


Figura 4.12: Maquinação - Eixo Frontal - Comparação Fornecedores - P8, P9, P10

Observou-se as sub-figuras resultantes, onde as semanas  $w1$  e  $w2$  apresentam valores médios em redor da nominal, ao contrário das semanas  $w3$  e  $w4$  que se apresentam ligeiramente descentradas do processo. As duas primeiras semanas ainda nos apresentam outra semelhança, reparou-se que no ponto  $MSN\_P8$  e  $MSN\_P9$  se alcançam os mesmos valores médios com uma dispersão similar se utilizássemos material S da semana  $w2$  com material N da semana  $w1$ , porém, alargando esta análise ao ponto  $MSN\_P10$  encontraria-se um registo semelhante mas com uma combinação invertida, o que serviu de alerta para alguma instabilidade.

Com esta observação reparou-se que apesar das semanas  $w3$  e  $w4$  não apresentarem um par de valores médios tão similar, apresentam dados mais regulares, ou seja, o material S da semana  $w4$  está nos três pontos apresentados muito perto do material N da semana  $w3$ , apresentando uma diferença do valor médio de meia décima de distância. Assim, conclui-se que pode existir uma boa hipótese de encontrar uma estabilização plausível a partir da semana  $w3$ .

#### **Pintura**

O primeiro módulo da produção integral da fábrica - processo de produção da geometria final - apresenta o seu término neste ponto. Deste modo, o estudo saltará para o segundo modo - aspeto visual (pintura) - por forma a analisar o efeito da pintura nas peças e na sua geometria final com acabamento.

O objetivo deste estudo é similar aos objetivos até aqui estabelecidos. Aferir como a pintura influência a geometria de forma a tentar encontrar um ponto de equilíbrio entre os dois fornecedores.

O método de pintura neste processo específico é a pintura a pó. É um processo onde as peças percorrem um trajeto dentro de uma estufa e estão colocadas num expositor onde passa corrente, convertendo as peças num eléctrodo que faz com que a tinta que é libertada na estufa adira às peças. É de notar que a pintura só se aplica ao fornecedor N.

A metodologia utilizada foi realizada por meio uma análise de variância a dois fatores - o tempo e a pintura. Os últimos dados recolhidos são do perfil pós maquinado, como durante a pintura não existe alteração da geometria, os perfis podem regressar ao gabarito de maquinação. Deste modo, recolhe-se dados pós pintura e possibilita-nos a realização da análise de variância a dois fatores.

Este parágrafo tem como fundamento a explicação do processo pós maquinação. Após as peças terminarem o processo de maquinação, necessitam de passar por uma estação onde sofrem um processo de lixamento, que tem como objetivo retirar a 'rebarba' deixada pelas serras e pelas fresas durante a maquinação. Após este procedimento as peças encontram-se prontas para a pintura.

Deste modo, recolheram-se as peças pintadas que foram colocadas novamente no gabarito da maquinação de modo a serem executadas as medições. Após a recolha e organização dos dados, recorreu-se ao programa *Statistica*, abriu-se o menu *Statistics* > escolheu-se a opção *Anova* > o tipo de análise *fatorial Anova* > denominou-se as *Variables*, dependentes e independentes > e por fim utilizou-se *All effects/ Graphs*. A figura que se

apresenta em seguida ilustrou o resultado do programa para o eixo completo da geometria final.

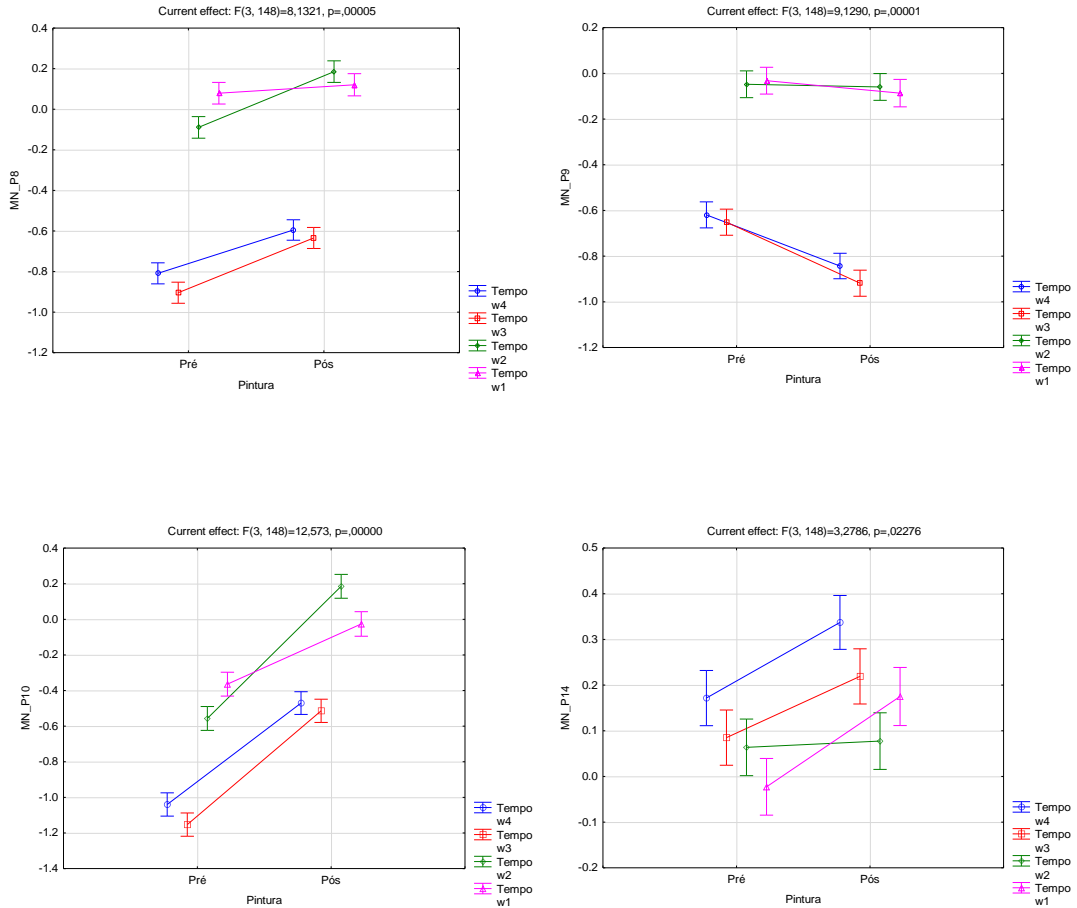


Figura 4.13: Maquinação - Pré e Pós Pintura - Fornecedor N - Eixo Frontal (P8, P9, P10) e Traseiro (P14)

Os referenciais apresentados possuem os pontos analisados nas ordenadas e o estado da pintura - Pré e Pós - nas abcissas. As subfiguras apresentam todas um nível válido de significância para o *p-value*. Esta atividade é alvo de análise devido ao facto de a pintura a pó utilizar temperaturas elevadas para o processo, o que poderá induzir novamente libertação de tensões acumuladas na dobragem e comprometer a geometria.

O resultado apresentou-se coerente entre os pontos *MN\_P8*, *MN\_P10* e *MN\_P14* existindo um decréscimo geométrico que varia uma décima na maior parte dos casos, podendo atingir um decréscimo de três décimas. A variação geométrica neste caso representaria uma dobragem, que não seria possível. Estudos que a empresa possui relativos ao serviço de pintura indicam que camada de tinta aplicada é  $\approx 3 \mu m$ , o que justifica a variação de 3 décimas apresentadas em alguns pontos do gráfico. Quanto aos resultados das semanas *w3* e *w4* na sub-figura *MN\_P9* pode indicar uma eventual libertação de tensões aliado a uma pequena quantidade de tinta acumulada no ponto.

Concluí-se deste modo que a pintura influencia a geometria final depois da aplicação do acabamento visual.



## CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

O estudo de caso, dentro do esperado, produziu respostas bastante positivas. Sendo resultante de um caso prático real, nomeadamente avarias de máquinas e amostras *not ok*. Porém, todo o processo e planeamento de testes correu como planeado.

A dureza era parte integrante de uma avaliação que tinha como objetivo, verificar as condições de envelhecimento natural e o envelhecimento acelerado. Os resultados não foram os esperados, as medições foram inconclusivas invalidando a análise previamente idealizada e os padrões que dela resultariam. Concluiu-se somente que o material atinge o estado  $T_6$ .

Na dobragem encontraram-se padrões similares entre os fornecedores ao longo das semanas, tanto ao nível do eixo frontal como do eixo traseiro. Mostrando deste modo uma condição de material igualmente semelhante visando uma janela de oportunidade para se realizar a dobragem de ambos os fornecedores num só programa.

Ao nível das médias apresentadas na dobragem do eixo frontal, encontraram-se resultados de uma variação da curva de dobragem que vai de encontro aos resultados que se esperava. Estes resultados, ilustraram um envelhecimento do material variável das duas primeiras semanas para as duas últimas, provando um endurecimento do material. Apesar deste apontamento, a variabilidade apresentada é constante, que prova que o material varia mas que essa variabilidade não é marcada pelas diferenças encontradas nas amostras.

O eixo traseiro, não foi de encontro aos resultados, porém, os resultados obtidos não permitem tecer comentários sustentados. Suspeitou-se simplesmente de uma causa que envolva a matriz de dobragem e as tensões aplicadas à peça durante o processo.

O Termo endurecimento, contrariamente ao que seria esperado, apresentou uma variação na geometria das peças, resultado das temperaturas aplicadas e do alívio de tensões. Porém apresentou um dado curioso, o material processado na semana  $w_3$ , apresentou um valor constante no pré e pós forno em todos os pontos medidos.

A maquinação das barras apresentou valores de varibilidade constantes, devido ao facto de não existir influência do equipamento de maquinação nas curvas das barras sendo que o corte é sempre realizado no mesmo local. O equipamento apresenta uma precisão elevada.

Quanto aos resultados das médias, conclui-se que os fornecedores apresentam materiais semelhantes e em condições semelhantes. As diferenças das médias resultantes, apresentadas semana após semana, vão de encontro ao padrão ilustrado na dobragem. Deste modo, pode afirmar-se que o eixo frontal correspondeu ao estudo como era esperado. O eixo traseiro possui a anotação especial acusada nas conclusões da dobragem com a diferença de que existiu um ponto que descreveu a condição de envelhecimento semelhante ao eixo frontal.

A pintura apresentou nos gráficos uma variação na geometria, não alusiva a uma alteração física, mas sim, resultante da quantidade de tinta aplicada. É, no entanto, necessário ter este ponto em conta, devido às amostras que se encontrem junto ao limite inferior de especificação, correndo o risco de se incorrer num erro de produção.

Concluindo, pode afirmar-se que o alumínio possui propriedades que variam ao longo dos tratamentos térmicos. Porém, o estudo referente a essa variação de propriedades na geometria, quanto à sua redução de dispersão amostral, provou-se inválido. E quanto às medições de dureza, tornaram-se inconclusivas.

Pode alegar-se que, de facto, existe uma mudança de estado do material, apresentado por curvas de dobragem diferentes. Porém, não foi possível encontrar um padrão que a justifique através da metodologia utilizada.

Refere-se deste modo que pode existir um intervalo válido para produzir os dois alumínios dos fornecedores com os mesmos programas em ambas as máquinas. Anotando uma estabilização a partir da terceira semana de vida do material.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Os trabalhos futuros idealizam algumas hipóteses. Demonstram-se duas abordagens diferentes, uma primeira da área da qualidade, traduzindo um *Desenho de Experiências*. E uma segunda da área de mecânica, visando o comportamento estrutural do material.

Dentro da primeira sequência apresentam-se os seguintes pontos de interesse.

O primeiro ponto seria realizar um estudo similar, com um espaço temporal alargado e com o início do estudo na terceira semana de vida do material.

Uma segunda hipótese interessante, seria realizar uma aborgagem com o mesmo processo de dobragem e maquinação (fixar o programa), mas fazendo variar a amostra, ou

seja, recolher a amostra baseada no mesmo tempo de vida do material e em contentores de extrusão diferentes.

A terceira abordagem seria seguir a mesma metodologia, mas aplicando ao estudo, um *record* realizado na dobragem aplicado à terceira semana.

Na abordagem mecânica, ilustra-se a realização de testes de tração realizados ao produto, de modo a estudar as propriedades do material, pela qual este se distingue, o *Módulo de Young*. O objetivo seria semelhante à metodologia da dureza. Deste modo, encontrar-se-ia a condição de material que se apresenta ideal para a produção.



## BIBLIOGRAFIA

- Constructeurs d'Automobiles, O. I. des (2019). *2018 Production Statistics*. URL: <http://www.oica.net/category/production-statistics/2018-statistics/>.
- Deming, W. E. (1966). *Some Theory of Sampling*. First. Dover Publications, INC. ISBN: 0-486-64684-X.
- Feigenbaum, A. V. (1991). *Total Quality Control*. Third. McGraw-Hill. ISBN: 0-07-020354-7.
- Juran, J. e A. B. Godfrey (1999). "Quality handbook". Em: *Republished McGraw-Hill*, pp. 173–178.
- Juran, J. M. (1992). *Juran on Quality by Design - The New Steps for Planing Quality into Goods and Services*. First. The Free Press". ISBN: 0-02-916683-7.
- LLC, C. G., F. M. Company e G. M. Corporation (2010). *Measurement Systems Analysis*. ISBN: 978-1-60-534211-5.
- Mello, A. V. de, R. B. da Silva, R. V. Arencibia, G. H. Silva, M. do Nascimento Souza e L. A. Fernandes.
- (2015). "Método das médias e amplitudes e análise de incerteza de medição dos ângulos de bits de HSS afiados com rebolo de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>". Em: *Blucher Mathematical Proceedings* 1.1, pp. 852–860.
- Montgomery, D. C. (2001). *Introduction to Statistical Quality Control*. New York: John Wiley & Sons. ISBN: 0-471-31648-2.
- Murteira, B. J. F. (1993). *Análise Exploratória de Dados - Estatística Descritiva*. First. McGraw-Hill. ISBN: 972-9241-25-2.
- Pereira, Z. L. e J. G. Requeijo (2012). *Qualidade: Planeamento e controlo estatístico de processos*. CAPARICA: Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. ISBN: 978-989-97721-0-6.
- Wilcox, R. R. (2001). *Fundamental of Modern Statistical Methods*. First. Springer. ISBN: 0-387-95157-1.



A N E X O



Amostra	P14	Amostra	P14	Amostra	P14	Amostra	P14
1	0.03	21	-0.01	41	-0.06	61	0.05
2	-0.04	22	0.01	42	-0.22	62	0.04
3		23	-0.08	43	-0.19	63	0.01
4		24	0.06	44	0.01	64	0.02
5	0.13	25	0.16	45	-0.07	65	0.04
6	0.17	26	0.06	46	-0.21	66	0.02
7	0.21	27	0.03	47	-0.05	67	-0.06
8	0.14	28	-0.2	48	-0.24	68	0.1
9	0.11	29	-0.2	49	-0.11	69	0.14
10	-0.06	30	-0.17	50	-0.25	70	-0.11
11	0.08	31	-0.02	51	-0.33	71	0.06
12	0.15	32	-0.03	52	-0.4	72	-0.07
13	0.06	33	-0.1	53	-0.29	73	0.2
14	-0.18	34	0.01	54	-0.22	74	-0.02
15	0.12	35	-0.07	55	-0.2	75	0.07
16	-0.15	36	-0.04	56	-0.07	76	-0.01
17	-0.01	37	0.09	57	-0.07	77	-0.01
18	0.16	38	-0.38	58	-0.15	78	0.09
19	0.12	39	-0.06	59	0.01	79	0.11
20	0.21	40	0	60	-0.32	80	-0.2

Figura I.1: Dados P14 - Recolha Cálculo CP

Source (Sigma=R-bar/d2)	Estimatd Sigma	Estimatd Variance	% of R & R	% of Total
Repeatability	0.033567	0.001127	67.6812	62.5850
Reproducibility	0.023195	0.000538	32.3188	29.8853
Part-to-Part	0.011643	0.000136		7.5297
Combined R & R	0.040801	0.001665	100.0000	92.4703
<b>Total</b>	<b>0.042430</b>	<b>0.001800</b>		<b>100.0000</b>
Source (Sigma=R-bar/d2)	Estimatd Sigma	Estimatd Variance	% of R & R	% of Total
<b>Repeatability</b>	<b>0.053082</b>	0.002818	38.8389	36.6928
Reproducibility	0.066612	0.004437	61.1611	57.7816
Part-to-Part	0.020599	0.000424		5.5255
Combined R & R	0.085176	0.007255	100.0000	94.4745
<b>Total</b>	<b>0.087631</b>	<b>0.007679</b>		<b>100.0000</b>
Source (Sigma=R-bar/d2)	Estimatd Sigma	Estimatd Variance	% of R & R	% of Total
Repeatability	0.016393	0.000269	88.2663	80.6199
Reproducibility	0.005977	0.000036	11.7337	10.7172
Part-to-Part	0.005374	0.000029		8.6629
Combined R & R	0.017449	0.000304	100.0000	91.3371
<b>Total</b>	<b>0.018257</b>	<b>0.000333</b>		<b>100.0000</b>

Figura I.2: *Statistica* - Percentagem da Variação Total- R&R - P3,P4, P6

Source (Sigma=R-bar/d2)	Estimatd Sigma	Estimatd Variance	% of R & R	% of Total
<b>Repeatability</b>	<b>0.037470</b>	0.001404	50.4645	46.9959
Reproducibility	0.037123	0.001378	49.5355	46.1307
Part-to-Part	0.014330	0.000205		6.8734
Combined R & R	0.052746	0.002782	100.0000	93.1266
Total	0.054658	0.002987		100.0000
Source (Sigma=R-bar/d2)	Estimatd Sigma	Estimatd Variance	% of R & R	% of Total
<b>Repeatability</b>	<b>0.089772</b>	0.008059	57.2840	52.9266
Reproducibility	0.077521	0.006009	42.7160	39.4666
Part-to-Part	0.034033	0.001158		7.6068
Combined R & R	0.118610	0.014068	100.0000	92.3932
Total	0.123396	0.015227		100.0000
Source (Sigma=R-bar/d2)	Estimatd Sigma	Estimatd Variance	% of R & R	% of Total
<b>Repeatability</b>	<b>0.149099</b>	0.022230	44.9306	43.2140
Reproducibility	0.165066	0.027247	55.0694	52.9655
Part-to-Part	0.044333	0.001965		3.8205
Combined R & R	0.222435	0.049477	100.0000	96.1795
Total	0.226810	0.051443		100.0000

Figura I.3: *Statistica* - Percentagem da Variação Total- R&R - P14,P16, P17