



# OPTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CALANDRAGEM DA TELA TÊXTIL

**TELMO RAFAEL DA SILVA E CASTRO**

novembro de 2017

# OPTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CALANDRAGEM DA TELA TÊXTIL

Telmo Rafael da Silva e Castro

**2017**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# OPTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CALANDRAGEM DA TELA TÊXTIL

Telmo Rafael da Silva e Castro  
1110302

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Manuel Pereira Lopes e supervisão do Engenheiro Pedro Neves.

**2017**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# JÚRI

## **Presidente**

<Grau Académico e Nome>

<Categoria, Instituição>

## **Orientador**

Doutor Manuel Pereira Lopes

Professor Adjuntos, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Arguente**

<Grau Académico e Nome>

<Categoria, Instituição>



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à minha família e em especial à minha mãe por proporcionar todas as condições necessárias para a minha educação e formação, pelo suporte e incentivo para conquistar mais um objetivo.

Ao meu orientador Professor Doutor Manuel Pereira Lopes pelo apoio prestado, motivação e disponibilidade que permitiram a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador Engenheiro Pedro Neves pela boa disposição, espírito crítico, perspicácia e auxílio no desenvolvimento do estudo.

À equipa Continental, nomeadamente ao Eng. Bruno Fernandes, Eng. Rui Santos, Eng. Jorge Veloso e demais, pelo caloroso acolhimento, bom ambiente de trabalho e conhecimentos transmitidos.

Aos meus amigos que de uma forma direta ou indireta contribuíram na minha evolução académica e pessoal.



**PALAVRAS CHAVE**

Melhoria da qualidade, calandragem têxtil, parâmetros com influência, planeamento e análise de experiências, Método de Taguchi.

**RESUMO**

A melhoria da qualidade é, cada vez mais, um fator determinante para a sustentabilidade das empresas. Com esse intuito, a Continental Mabor propôs um caso de estudo associado à calandragem têxtil, de modo analisar os parâmetros com influência no processo e conseqüentemente na qualidade do produto.

O presente documento pretende apresentar a metodologia aplicada para solução do problema, descrevendo detalhadamente as etapas de monitorização do processo, estudo dos sistemas de medição e concretização de testes. O desenho, planeamento e análise de experiências teve como base o Método de Taguchi, permitindo este a obtenção de informação significativa através de um reduzido número de ensaios.

No decorrer deste trabalho são expostas medidas de forma a melhorar os sistemas de medição das propriedades da tela têxtil. Posteriormente, em conformidade com as condições estabelecidas, são assinalados os parâmetros com impacto no desempenho da calandragem, assim como os níveis que aproximam a resposta do sistema aos valores especificados.



**KEYWORDS**

Quality improvement, textile calendering, parameters with influence, planning and analysis of experiments, Taguchi Method.

**ABSTRACT**

The quality improvement is, increasingly, a determining factor for entities sustainability. For this purpose, Continental Mabor proposed a case study associated to the textile calendering, in order to analyse the parameters with influence on the process and consequently on the product quality.

The present document intends to present the methodology applied to solve this problem, describing in detail the stages of monitoring process, measurement systems study and test execution. The design, planning and analysis of the experiments was based on the Taguchi Method, which allows to obtain significant data through a small number of tests.

During the course of this work, it is exposed measures to improve the properties measurement systems of the rubberized cord sheet. Subsequently, in accordance with the established conditions, the parameters with impact on the performance of the calendering are identified, as well as the levels that bring the system response close to the specified values.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

ANOVA	Análise de variância
ANOM	<i>Analysis of means</i>
CAL1	<i>Calandra 1</i>
CAL2	<i>Calandra 2</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
EUA	Estados Unidos da América
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ITA	Indústria Têxtil do Ave
FFE	Fração fracionado de experiências
SPSS	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i>

### Lista de Unidades

Bar	-
dB	Decibel
kN	Quilo Newton
N	Newton
mm	Milímetros
m	Metro
rpm	Rotações por minuto
V	Volt

### Lista de Símbolos

°C	Graus Celsius
$\alpha$	Nível de significância
$\sigma$	Desvio-padrão
$\Omega$	Ohm
%	Porcentagem
$\Sigma$	Somatório



## GLOSSÁRIO DE TERMOS

---

Banco de borracha	Composto acumulado entre rolos 1-2 e 3-4
<i>Gap</i>	Espaçamento entre rolos da calandra
Setup	Configuração dos parâmetros do equipamento
Pneu em verde	Estrutura definitiva do pneu antes da vulcanização
Tensómetro	Equipamento para ensaios de tração

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – INSTALAÇÕES DA CONTINENTAL MABOR – INDÚSTRIA DE PNEUS, S.A. (FONTE: CONTINENTAL MABOR) .....	35
FIGURA 2- ESQUEMA DO PROCESSO PRODUTIVO (FONTE: CONTINENTAL MABOR). .....	36
FIGURA 3 - COMPONENTES DO PNEU (ADAPTADO CONTINENTAL). .....	39
FIGURA 4 - CONFIGURAÇÃO DOS ROLOS DA CALANDRA (ADAPTADO PHILIP [4]).....	44
FIGURA 5 – (A) ROLL CROWNING (B) ROLL CROSSING (C) ROLL BENDING (ADAPTADO CONTINENTAL)...	45
FIGURA 6 – ESQUEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE CALANDRAGEM (ADAPTADO CONTINENTAL). .....	48
FIGURA 7 – (A) CORDA DE POLIÉSTER AO MICROSCÓPIO COM FATOR DE AMPLIAÇÃO X20; (B) ESQUEMATIZAÇÃO DO TECIDO CALANDRADO EM CORTE (FONTE CONTINENTAL); (C) ASPETO FINAL DO TECIDO CALANDRADO. ....	50
FIGURA 8 – SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ESPESSURA PÓS-CALANDRA (ONLINE) (ADAPTADO PETRA [5])....	50
FIGURA 9 – SISTEMA DE MEDIÇÃO MANUAL (OFFLINE). .....	51
FIGURA 10 – ENSAIO DE GREEN-ADHESION (CONTINENTAL) E MEDIDOR DE ADESIVIDADE.....	52
FIGURA 11 - DIAGRAMA DE BLOCO REPRESENTATIVO DE UM PRODUTO/PROCESSO (ADAPTADO PHADKE [15]).....	64
FIGURA 12 – DECOMPOSIÇÃO DOS EFEITOS DOS FATORES DOS RESULTADOS S/N OBSERVADOS (ADAPTADO PADKE [15]). .....	73
FIGURA 13 – PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO DOS COMPONENTES DA CALANDRAGEM. ....	88
FIGURA 14 - LOCALIZAÇÃO DA RECOLHA DAS AMOSTRAS PARA A MEDIÇÃO DA ESPESSURA. ....	89
FIGURA 15 – LOCALIZAÇÃO DA RECOLHA DAS AMOSTRAS PARA CONTROLO DA ADESIVIDADE. ....	91
FIGURA 16 – PONTOS DE MEDIÇÃO DE UMA AMOSTRA ATRAVÉS DO MÉTODO OFFLINE (PERFILÓMETRO).....	92
FIGURA 17 – DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO ONLINE (ADAPTADO PETAR [5]).....	93
FIGURA 18 - GRÁFICO DO CONTROLO DE ESPESSURA ANTES DA ATUALIZAÇÃO DE OFFSETS. ....	94
FIGURA 19 – GRÁFICO DO CONTROLO DE ESPESSURA APÓS A ATUALIZAÇÃO DE OFFSETS.....	95
FIGURA 20 – DIAGRAMA DE CAUSA E EFEITO PARA A VARIAÇÃO DO TECIDO CALANDRADO (ADAPTADO CONTINENTAL). .....	100



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – EXEMPLO DE TRANSFORMAÇÃO DE DADOS PARA CASOS COM VALORES DUPLICADOS. ....	57
TABELA 2 – FATORIAL COMPLETO DE EXPERIÊNCIAS (ADAPTADO ROSS [16]). .....	63
TABELA 3 – COMPARAÇÃO ENTRE O FATORIAL COMPLETO E MÉTODO DE TAGUCHI (ADAPTADO ROY [13]).....	65
TABELA 4 – MATRIZ ORTOGONAL L8 INTERNA E L4 EXTERNA (ADOTADO ROSS [16]). .....	67
TABELA 5 – TABELA TRIANGULAR DA MATRIZ ORTOGONAL L8 (ADAPTADO PHADKE [15]).....	69
TABELA 6 - EXPERIÊNCIA COM RESOLUÇÃO 4 (ADAPTADO ROSS [16]). .....	70
TABELA 7 - EXEMPLO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O DESENHO DE EXPERIÊNCIAS (ADAPTADO ROSS [16]).....	83
TABELA 8 – TABELA DE REGISTO DA ATUALIZAÇÃO DE OFFSET PARA MATERIAL TÊXTIL. ....	94
TABELA 9 – EXCERTO DA TABELA DE CORRELAÇÕES PARA MATERIAL P1319 (CALANDRA 1). ....	98
TABELA 10 – DESCRIÇÃO DOS FATORES, INTERAÇÕES E NÍVEIS PARA O PLANEAMENTO DE EXPERIÊNCIAS. ....	102
TABELA 11 – ALOCAÇÃO DOS FATORES E INTERAÇÕES NA MATRIZ ORTOGONAL L8 DE TAGUCHI. ....	103
TABELA 12 - ORGANIZAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DA MATRIZ ORTOGONAL L8 PARA A REALIZAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS. ....	106
TABELA 13 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DA ESPESSURA. ....	111
TABELA 14 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DO GREEN-ADHESION.....	114
TABELA 15 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS RESULTADOS DA ADESIVIDADE. ....	116
TABELA 16 – QUADRO RESUMO DOS PARÂMETROS INFLUENTES RELATIVOS A CADA PROPRIEDADE...117	
TABELA 17 - QUADRO RESUMO DOS RESULTADOS OBSERVADOS E PREVISTOS PARA A EXPERIÊNCIA DE VALIDAÇÃO. ....	118
TABELA 18 - RESULTADOS DA EXPERIÊNCIA DE VALIDAÇÃO PARA AS DIFERENTES PROPRIEDADES.....	119
TABELA 19 – EXPERIÊNCIAS FATORIAL FRACIONADO (ADAPTADO ROSS [16]). .....	131
TABELA 20 - RESOLUÇÃO DAS MATRIZES ORTOGONAIS (ADAPTADO ROSS [16]).....	133
TABELA 21 – RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES PARA O MÉTODO DE MEDIÇÃO DA ADESIVIDADE (EM N). ....	134
TABELA 22 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE CORRELAÇÕES SEGUNDO SPEARMAN PARA O P1319 E P1365 (CALANDRA 1). ....	135
TABELA 23 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE CORRELAÇÕES SEGUNDO SPEARMAN PARA O P1370 E P1377 (CALANDRA 1). ....	136
TABELA 24 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE CORRELAÇÕES SEGUNDO SPEARMAN PARA O R1564 E R3002 (CALANDRA 1). ....	137
TABELA 25 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE CORRELAÇÕES SEGUNDO SPEARMAN PARA O P1319 (CALANDRA 2). ....	138
TABELA 26 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE CORRELAÇÕES SEGUNDO SPEARMAN PARA O P1365 (CALANDRA 2). ....	139
TABELA 27 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE CORRELAÇÕES SEGUNDO SPEARMAN PARA O P1370 (CALANDRA 2). ....	140

---

TABELA 28 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE CORRELAÇÕES SEGUNDO SPEARMAN PARA O R1564 (CALANDRA 2). .....	141
TABELA 29 - RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS PARA A PROPRIEDADE ESPESSURA (EM MM) E RESPETIVOS RESULTADOS NA RAZÃO S/N. ....	145
TABELA 30 - RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS PARA A PROPRIEDADE GREEN-ADHESION (EM N) E RESPETIVOS RESULTADOS NA RAZÃO S/N. ....	146
TABELA 31 - RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS PARA A PROPRIEDADE ADESIVIDADE (EM N) E RESPETIVOS RESULTADOS NA RAZÃO S/N. ....	147

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
<b>1.1</b>	<b>Enquadramento</b>	<b>27</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>28</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura da dissertação</b>	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>APRESENTAÇÃO DA EMPRESA</b>	<b>33</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>33</b>
<b>2.2</b>	<b>Continental</b>	<b>33</b>
2.2.1	Continental AG	33
2.2.2	Continental Mabor	34
<b>2.3</b>	<b>Descrição geral do processo produtivo</b>	<b>35</b>
<b>2.4</b>	<b>Componentes do pneu</b>	<b>38</b>
<b>3</b>	<b>CASO DE ESTUDO</b>	<b>43</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>43</b>
<b>3.2</b>	<b>Calandragem</b>	<b>43</b>
<b>3.3</b>	<b>Tela têxtil</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>55</b>
<b>4.2</b>	<b>Correlação de Spearman</b>	<b>55</b>
<b>4.3</b>	<b>Método de Taguchi</b>	<b>58</b>
4.3.1	Planeamento de experiências	62
4.3.2	Construção das matrizes ortogonais	65
4.3.3	Análise dos resultados	71

<b>5</b>	<b>METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO</b>	<b>87</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>87</b>
<b>5.2</b>	<b>Recolha de informação</b>	<b>87</b>
5.2.1	Processo produtivo	87
5.2.2	Método de medição da adesividade	90
<b>5.3</b>	<b>Tratamento de dados</b>	<b>92</b>
5.3.1	Sistema de medição da espessura	92
5.3.2	Método de medição da adesividade	95
5.3.3	Correlações dos parâmetros	97
<b>5.4</b>	<b>Planeamento das experiências</b>	<b>99</b>
5.4.1	Seleção dos parâmetros	99
5.4.2	Construção da matriz ortogonal	103
5.4.3	Procedimento experimental	103
<b>6</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>109</b>
<b>6.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>109</b>
<b>6.2</b>	<b>Resultados das experiências</b>	<b>109</b>
6.2.1	Espessura	110
6.2.2	Green-Adhesion	113
6.2.3	Adesividade	115
<b>6.3</b>	<b>Quadro resumo</b>	<b>116</b>
<b>6.4</b>	<b>Validação</b>	<b>117</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>123</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO</b>	<b>127</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>131</b>
	<b>Anexo A</b>	<b>131</b>
	<b>Anexo B</b>	<b>132</b>
	<b>Anexo C</b>	<b>133</b>
	<b>Anexo D</b>	<b>134</b>
	<b>Anexo E</b>	<b>135</b>

---

<b>Anexo F</b>	<b>142</b>
<b>Anexo G</b>	<b>145</b>
<b>Anexo H</b>	<b>146</b>
<b>Anexo I</b>	<b>147</b>



# INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

1.2 OBJETIVOS

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO



# 1 INTRODUÇÃO

Este documento apresenta o trabalho desenvolvido para a dissertação em torno do tema “Otimização do processo de calandragem da tela” no âmbito do Mestrado de Engenharia Mecânica, na especialidade de Gestão Industrial, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

## 1.1 Enquadramento

A progressiva evolução do mercado industrial e consequente aumento da exigência por parte dos clientes cria uma necessidade crescente na melhoria da qualidade. Deste modo, a relação qualidade-preço dos produtos/serviços prestados passa a ser um fator determinante da sustentabilidade das empresas.

Procurando a melhoria contínua da qualidade do produto, bem como a redução da variação das suas características, foi realizado um estudo em ambiente industrial, incidindo no processo de calandragem têxtil, na empresa Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A.

Este trabalho focou-se na análise dos parâmetros de funcionamento da calandragem, acompanhando o processo desde a alimentação das matérias-primas no sistema até à fase de armazenamento deste subproduto. As possíveis causas de variação das propriedades foram investigadas, analisando ainda os sistemas de medição adjacentes ao controlo e qualidade do processo.

Na Continental Mabor, a calandragem é responsável pela produção de dois subprodutos do pneu, nomeadamente a tela têxtil e tela metálica. A calandra em estudo é constituída por um sistema de quatro rolos em que inicialmente são criadas duas camadas de composto de borracha e posteriormente serão unidas entre si contendo no seu interior filamentos têxteis/metálicos. Para efeitos de estudo apenas foram considerados os parâmetros do processo relativos à calandragem de tela têxtil, assim como informações do composto correspondente ao seu processamento.

Por forma a identificar os fatores com impacto na calandragem têxtil foi necessário estabelecer um método capaz e compatível com o problema. Com esse intuito, deu-se

uso ao Método de Taguchi para planeamento e tratamento das experiências a executar. Taguchi delineou um conjunto de etapas de modo a analisar os parâmetros associados ao produto/processo, utilizando um reduzido número de experiências.

A aplicação desta técnica no caso de estudo incidiu sobre a respostas do processo de calandragem, tendo por base as propriedades espessura, *green-adhesion* e adesividade da tela têxtil. Dado a complexidade do problema definiu-se a diminuição da variação da espessura como objetivo, desenvolvendo o planeamento de experiências em função desta condição.

## 1.2 Objetivos

O trabalho desenvolvido pretende auxiliar a melhoria e estabilidade do processo de calandragem, tendo como principal objetivo a determinação dos parâmetros influentes nas propriedades do produto. Este estudo focou-se na diminuição da variação da espessura, sem que, em grande escala, outras características fossem afetadas.

Com esse propósito foram subdivididas as tarefas a executar nos seguintes passos:

- Monitorização dos parâmetros do processo de calandragem;
- Avaliar os sistemas de medição das propriedades do tecido calandrado;
- Identificar parâmetros com impacto no processo, pelo Método de Taguchi;
- Determinar os valores dos parâmetros que otimizam o desempenho do processo.

O primeiro passo dedicava-se ao conhecimento do processo assim como à criação de um registo de valores dos parâmetros de funcionamento e observações. Este procedimento pretendeu identificar potenciais causas de variações no sistema, desde a falha humana a problemas nas componentes do processo.

De seguida, foram analisados os sistemas de medição das propriedades selecionadas para o efeito, com a finalidade de compreender a capacidade dos mesmos. Para tal,

procedeu-se à retificação das configurações das componentes e melhoria dos aspetos inerentes à metodologia de medição, procurando diminuir o erro associado.

Por fim, procurando identificar os parâmetros com influência no processo e valores que otimizavam a resposta das propriedades do produto, foi utilizado o Método de Taguchi. Este permitiu obter conhecimento das características do processo determinantes para o produto, levando a compromissos nas configurações para a redução da variação e conseqüente incremento da qualidade.

### 1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em sete capítulos principais, os quais estão subdivididos em subcapítulos, de forma a uma melhor compreensão dos seus conteúdos.

O primeiro capítulo, de natureza introdutória, contempla uma breve descrição do tema que conduz esta dissertação e os seus objetivos.

No capítulo 2 é apresentado o levantamento bibliográfico dos conceitos científicos que sustentaram o desenvolvimento da dissertação.

O capítulo 3 introduz a história da empresa em que foi desenvolvido o trabalho e descreve seu sistema de produção do pneumático.

O quarto capítulo caracteriza o processo de calandragem analisado em contexto industrial.

No capítulo 5 é descrito o procedimento de investigação do caso de estudo apresentado.

O capítulo 6 expõe a informação relativa aos resultados recolhidos através da realização de experiências para os parâmetros preponderantes na calandragem têxtil.

Finalmente, no último capítulo são apresentadas as considerações finais sobre os resultados obtidos e sobre o trabalho, bem como sugestões que possam melhorar futuramente o processo estudado.



# APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

2.1 INTRODUÇÃO

2.2 CONTINENTAL

2.2.1 CONTINENTAL AG

2.2.2 CONTINENTAL MABOR

2.3 DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO PRODUTIVO

2.4 COMPONENTES DO PNEU



## 2 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

### 2.1 Introdução

No corrente capítulo proceder-se-á a uma apresentação sucinta da cronologia da empresa na qual foi desenvolvido o projeto, introduzindo uma visão geral da história do grupo e das instalações em Portugal. Será ainda descrito o seu sistema produtivo da unidade de pneumáticos e componentes do produto.

### 2.2 Continental

#### 2.2.1 Continental AG

A origem da Continental remete ao ano de 1871 na localidade de Hannover (Alemanha), iniciando a sua atividade com o fabrico de produtos compostos essencialmente por borracha, como tecidos emborrachados, pneus maciços para carruagens e bicicletas, entre outros.

No ano de 1898, a empresa inaugura a sua produção de pneumáticos de piso liso para automóveis, acompanhando desde então a evolução do mercado automóvel, fornecendo produtos e equipamento para melhoria do pneu. O progresso da Continental conduziu a tornar-se a pioneira no desenvolvimento e produção de pneumáticos para automóveis com desenho (sulcos) no piso, em 1904.

Fruto do progresso e inovação, a Continental encontra-se entre os principais fornecedores da indústria automóvel, visando o aumento da segurança rodoviária e proteção do ambiente. Deste modo, a empresa está presente no mercado em dois grupos: Sistemas Automotivos (*Chassis & Safety, Powertrain, Interior*) e Componentes de Borracha (Pneus, Contitech). O primeiro grupo direciona-se para o desenvolvimento de sistema de segurança do automóvel, controlos dinâmicos, tecnologias de transmissão de potência, sensores, entre outros. O segundo grupo foca-se na produção de pneumáticos como os de ligeiros e pesados e ainda componentes e sistemas do ramo automóvel.

De momento em Portugal o grupo Continental possui 5 empresas:

- Continental Mabor – Indústria de pneus S.A. onde são produzidos pneumáticos para automóveis;
- Continental Pneus Portugal S.A. especializada pela comercialização dos pneus construídos pela Continental AG;
- Indústria Têxtil do Ave, S.A. (ITA) fabricante de produtos têxtil para a indústria da borracha;
- Continental Teves Portugal – Sistemas de Travagem, Lda. responsável pela produção e montagem de travões para fabricantes de renome;
- Continental Lemmerz Portugal – Componentes para Automóveis, Lda. focada na montagem de jante e pneus para viaturas da AutoEuropa.

### 2.2.2 Continental Mabor

A Continental instala-se em Portugal através da aquisição parcial e, num curto espaço de tempo, passando a deter totalmente a empresa de produção de pneumáticos Mabor – Manufatura Nacional de Borracha, S.A., nascendo assim no ano de 1989 a Continental Mabor – Indústria de pneus, S.A.

A Mabor é inaugurada em 1946 na localidade de Lousado, Vila Nova de Famalicão, tornando-se a primeira fábrica de pneus em Portugal, contando com o apoio técnico da *General Tire*, sedia em Ohio (EUA). Dedicada ao fabrico de pneumáticos para diversos transportes como ligeiros, pesados e motos, alcançou no ano de 1990 uma produção média diária de 5000 pneus.

Devido ao envelhecimento da fábrica e das maquinarias, a Continental Mabor inicia em julho de 1990 um programa de reestruturação da unidade, transformando-se na mais moderna das 21 instalações da Continental (ver Figura 1). Este desenvolvimento proporcionou o aumento de aproximadamente quatro vezes a capacidade da unidade, estabelecendo a sua produção média em 1996 de 21000 pneus/dia. Atualmente, a empresa é umas das instalações com maior índice produtivo, contando com cerca de

1800 colaboradores e com uma produção média de 57000 pneus/dia, dos quais 98% destinam-se à exportação.

Nos dias de hoje, são fabricados pneumáticos para ligeiros, SUVs e pneus anti furo com uma variada gama de produtos destinados ao equipamento de origem de automóveis das principais marcas da indústria, bem como para o mercado de substituição.



Figura 1 – Instalações da Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A. (fonte: Continental Mabor)

### 2.3 Descrição geral do processo produtivo

O processo de produção de pneus é um processo complexo e constituído por várias etapas até à obtenção do produto final, em que a análise dos mais minuciosos detalhes é determinante para o fabrico de pneumáticos de alta qualidade.

Na Continental Mabor, o sistema produtivo encontra-se subdividido em cinco departamentos, intrinsecamente ligados as componentes e fases do pneu. A unidade alberga ainda dois armazéns, nomeadamente o armazém de matérias-primas e o armazém de produto acabado.

De uma forma resumida, o processo pode ser esquematizado na seguinte imagem (ver Figura 2), onde é possível verificar o controlo nos diversos estágios dos materiais, assim como o percurso dos mesmos ao longo da cadeia produtiva.

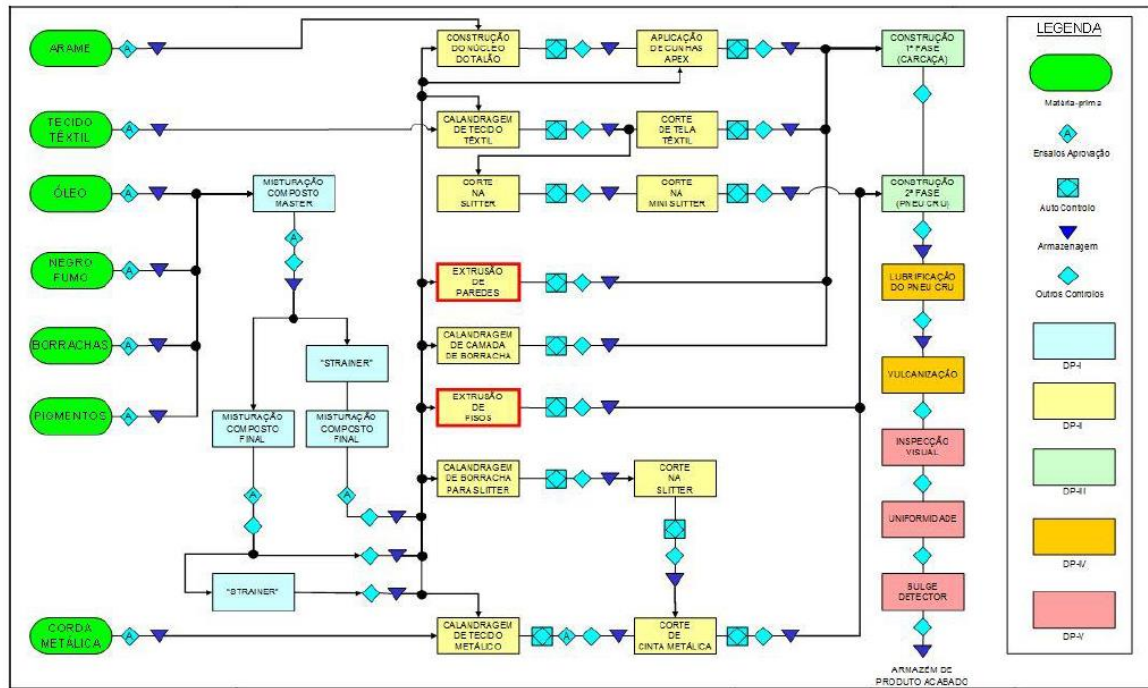


Figura 2- Esquema do processo produtivo (fonte: Continental Mabor).

Os departamentos presentes nas infraestruturas serão descritos de uma forma concisa em seguida:

#### ▪ Departamento da Misturação (DP I)

A composição de um pneu deriva de um grande número de diferentes compostos. Estes são desenvolvidos e testados de forma a alcançar os atributos exigidos.

O processo de misturação é o processo responsável pela formação dos diversos compostos, dos quais são constituídos com as percentagens especificadas de borrachas naturais e sintéticas, óleos, negro de fumo, pigmentos, aceleradores, entre outros.

Iniciando pela pesagem das matérias-primas, estas seguem para o misturador onde, por ação mecânica, é executada a misturação, passando ainda por um moinho e um sistema de arrefecimento, resultando numa pasta homogênea com espessuras de 20 a 30 mm. Estas são armazenadas em paletes metálicas individuais, denominadas o conjunto como mesas de composto. Os compostos

são ainda alvo de testes laboratoriais, assegurando que as propriedades pretendidas estão presentes para os processos seguintes.

- **Departamento da Preparação (DP II)**

O departamento de preparação é o departamento que abrange o maior número de processos interligados ao fabrico e preparação de todos os componentes dos pneumáticos, podendo este ainda ser repartido por dois tipos de preparação: a preparação a frio e a preparação a quente.

A preparação a frio é composta por extrusoras, calandras, *innerliner's* e máquinas de corte, sendo criados subprodutos como tela têxtil e metálica, camada estanque, talões, entre outros. Na preparação a quente, os constituintes são produzidos por extrusoras, CT's, Apex's, resultando em pisos, paredes e cunhas.

- **Departamento da Construção (DP III)**

Como o próprio nome indica, este departamento dedica-se à construção dos pneumáticos. Aqui, todos os subprodutos supracitados são colocados numa ordem específica, obtendo o chamado "pneu em verde". Esta denominação deve-se ao facto de o pneu encontrar-se com a sua estrutura definida, sem ainda ter sofrido vulcanização.

Para todos os pneus, este processo inicia-se na construção da carcaça, constituída por camada estanque, tela têxtil, paredes e talão, passando para outra fase onde irá receber os restantes componentes em função do produto desejado.

- **Departamento da Vulcanização (DP IV)**

Prosseguindo no sistema produtivo, o pneumático é transportado para cabines de pintura que irão lubrificar interiormente, facilitando assim o processo de desmoldagem e aumentando a vida útil das máquinas.

Concluída esta fase, segue para a vulcanização onde todas as suas componentes são aglomeradas por ação de altas temperaturas e pressões, efetuando a cura da borracha, atribuindo a forma e propriedades finais do pneu. Este processo tem uma duração de 10 minutos dentro do equipamento, terminando a cura na zona exterior próxima da máquina.

- **Departamento da Inspeção Final (DP V)**

Chegando ao último departamento da linha de produção, o pneu é sujeito a um conjunto de ensaios com o intuito verificar algum tipo de não conformidade, garantindo assim as características especificadas e a qualidade do mesmo. Ainda é executada uma inspeção visual aos pneumáticos, analisando a presença de defeitos não identificados anteriormente, corrigindo qualquer irregularidade superficial resultantes do excesso de borracha.

## 2.4 Componentes do pneu

A roda é considerada umas das invenções mais importantes da história humana, devido à grande variedade de aplicações, como em veículos de transportes, equipamentos de construção e partes de máquinas. O seu aparecimento data de há mais de 5000 anos atrás, na Idade do Bronze, para movimentação de objetos pesados, fruto do desenvolvimento de dispositivos como rolos. [1]

Com a evolução dos tempos, a associação de rodas ao movimento foi cada vez mais vincada, havendo registo de veículos de quatro rodas com eixo de direção frontal à data de 1500 anos da Era precedente. Adaptando para fins militares, nasce um “pneu” no qual foi aplicado couro, e posteriormente cobre e ferro, com o intuito de diminuir a deterioração das rodas com armação em madeira.

Em 1846, em Inglaterra, é concedida uma patente a R.W.Thomson de um “*air tube device*”, antecessor dos pneumáticos, procurando reduzir o ruído, tornar o deslocamento mais fácil e diminuir a força necessária para a movimentação. Apenas em 1888 é que esta invenção começa a ganhar uma grande utilização, sendo que nos dias de hoje o pneu permitiu a evolução dos mais sofisticados sistemas de transporte.

[1, 2]

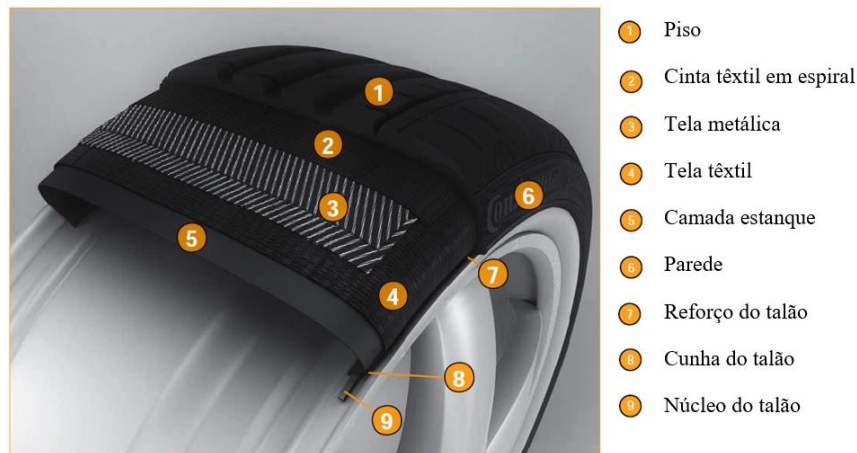


Figura 3 - Componentes do pneu (adaptado Continental).

O progresso da industrialização Norte Americana e a descoberta da vulcanização por Charles Goodyear, permitiu a evolução dos tubos de borracha envolvidos em tela impregnada para os mais complexos pneumáticos constituídos por têxtil, aço e compostos de elastómeros. Atualmente, as funções dos pneus passam por fornecer a capacidade de carga e amortecimento, a transmissão de movimento, a garantia de estabilidade dimensional bem como a segurança e elevada durabilidade.

Na base dos componentes do pneu encontram-se os compostos de borracha que são fundamentais para alcançar a características pretendidas para cada tipo de pneu. Em média, um pneu contém 41% de borrachas naturais e sintéticas, 30% de enchedores como sílica e negro de fumo, 15% de materiais para reforço (poliéster, aço, *rayon*, *nylon*), 6% de plastificantes (óleos e resinas), 6% de químicos para vulcanização como enxofre e óxido de zinco, e 2 % para outros químicos.

A estrutura de um pneumático é apresentada na figura acima (ver Figura 3), sendo que cada componente desempenha as seguintes funções:

- **Piso** - fornecer aderência, estabilidade direcional e resistência ao desgaste;
- **Cinta têxtil em espiral** - promover a adaptabilidade em altas velocidades;
- **Tela metálica** - aumentar a longevidade do pneu, reduzir a resistência ao rolamento, reter a forma do pneu;
- **Tela têxtil** - fornecer consistência ao pneu e resistir as altas pressões internas;

- **Camada estanque** - reter a ar dentro do pneu;
- **Parede** - proteger a carcaça contra choques laterais e a degradação atmosférica;
- **Reforço do talão** - conceder estabilidade direcional e aumentar o conforto;
- **Cunha do talão** - fornecer estabilidade direcional e precisão na condução;
- **Núcleo do talão** - assegurar que pneu assente com firmeza na jante.

# CASO DE ESTUDO

3.1 INTRODUÇÃO

3.2 CALANDRAGEM

3.3 TELA TÊXTIL



## 3 CASO DE ESTUDO

### 3.1 Introdução

Este capítulo é dedicado à caracterização de um processo da preparação a frio da Continental Mabor, nomeadamente o processo de calandragem, incidindo na vertente da calandragem têxtil de poliéster e *rayon*. O processo inclui outras matérias-primas, como será exposto no documento, que não foram consideradas para efeito do estudo por deliberação da empresa.

### 3.2 Calandragem

Os moinhos de dois rolos e as calandras, equipamentos com grande similaridade, têm sido utilizados ao longo dos anos no processamento de borracha natural, tendo sido introduzidos na década de 1830 por Edwin Chaffe e Charles Goodyear nos Estados Unidos. [3]

O processo de calandragem define-se como uma operação de conformação, sem que exista alteração do estado das substâncias, onde os compostos de borrachas são transformados em folhas do composto ou impregnados em materiais como têxtil e metal. Neste último caso, cada filamento deve ser envolvido por borracha, obtendo-se respetivamente tela têxtil e tela metálica. [1, 4]

A calandra é um equipamento sofisticado de grande porte, normalmente constituída por 3 ou mais rolos dependendo este número da natureza do material a processar e do produto. O uso de calandras com 4 rolos, em geral é dedicado ao duplo revestimento de materiais, pela criação de duas camadas independentes de borracha, posteriormente unidas aos filamentos. [1]

Podendo acomodar variadas configurações para o posicionamento dos rolos (ver Figura 4), o uso de uma determinada configuração para a calandra deve considerar as limitações do projeto, bem como o percurso da borracha e dos materiais a impregnar.

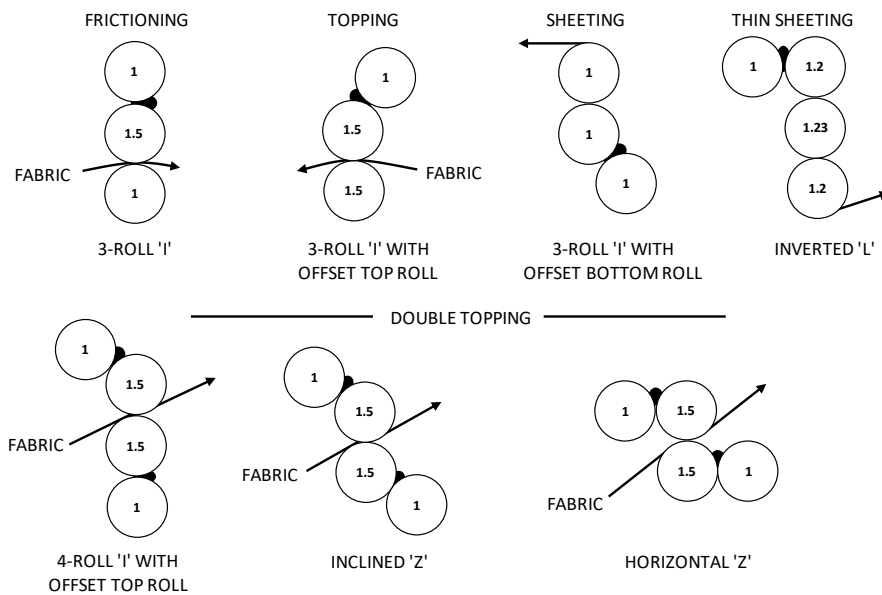


Figura 4 - Configuração dos rolos da calandra (adaptado Philip [4]).

A primeira configuração a ser utilizada foi a configuração vertical ou em “I”, contudo esta apresentava dificuldade em ser alimentada por tiras de borracha contínuas no espaço entre rolos (*gap*) e problemas nas interações das forças entre *gap*'s. As configurações triangulares e em “Z” mostraram-se as melhores para a calandragem de alta precisão, sendo que o *design* em “Z” inclinado alcançou um bom compromisso entre acessibilidade e interação de forças dos espaços entre rolos. [4]

Na Continental, a configuração standard para a calandragem é a constituída por quatro rolos metálicos em “Z” inclinado, onde a temperatura é controlada internamente nos rolos por água, conseguindo uma precisão de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  sobre o valor alvo a velocidades em torno dos 30 a 40 metros por minuto. A diferença de temperaturas, velocidades e superfície entre os diferentes rolos permite que as camadas de borracha se fixem aos rolos pretendidos. [3, 4]

Em produção, a calandra deve conseguir uma tela que apresenta uma espessura uniforme a toda a sua largura, com capacidade adequada de aderir a outros componentes do pneumático e ao material impregnado. As propriedades da tela calandrada são resultado de um grande conjunto de parâmetros, que afetam direta ou indiretamente o processo e o produto. Com a finalidade de atuar e controlar as variações de espessura, foram desenvolvidas diferentes metodologias de ação direta sobre os rolos da calandra, expostos na Figura 5.

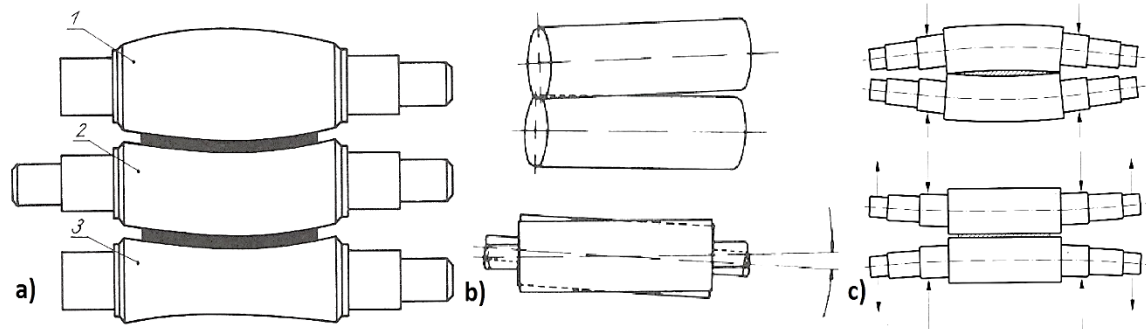


Figura 5 – (a) *Roll crowning* (b) *Roll crossing* (c) *Roll bending* (adaptado Continental).

No normal funcionamento de qualquer sistema produtivo são sentidas flutuações no processo, que devem ser prevenidas ou corrigidas de forma a obter as características especificadas. Juntamente aos três métodos acima apresentados, a calandragem possui a capacidade de ajustar o espaçamento entre rolos (*gap*), sendo que exceto o *roll crowning*, todas as técnicas de correção são controladas automaticamente pelo sistema, com a possibilidade de serem ajustadas manualmente.

O conceito de *roll crowning* é baseado na alteração dos diâmetros dos rolos, na ordem do milímetro, por forma a superar forças impostas pela passagem do composto entre rolos que resultam na flexão dos mesmos, garantindo assim uma menor variação da espessura e uma maior longevidade dos componentes.

O método de *roll crossing* consiste na alteração do eixo de rodagem do rolo em função do rolo seguinte, provocando um aumento do *gap* nas extremidades do produto calandrado, permitindo assim o aumento da espessura nessas zonas caso necessário.

Por fim, o *roll bending* traduz-se na aplicação de forças nas extremidades dos rolos, aumentando ou diminuindo a flexão destes, alterando o perfil do *gap*. [3]

Associados a este processo, encontram-se outros componentes que permitem o funcionamento da calandra em contínuo, salvo paragens não programadas ou alteração de material têxtil para metálico e vice-versa, dividindo-se essencialmente na preparação do composto de borracha, do material têxtil e no armazenamento do tecido calandrado.

Como demonstrado na Figura 6, a calandragem é formada por sete componentes principais para além da calandra, tendo as seguintes finalidades:

- **Extrusora**

A extrusora é responsável por receber o composto proveniente da mistura e iniciar o processo de uniformização e plastificação. Desta resultam porções de borracha com temperatura na ordem dos 80°C dotados de uma menor viscosidade, facilitando o processamento em estágios seguintes.

- **Moinho de homogenização**

Esta componente dedica-se ao incremento da homogeneidade do composto, através da passagem das porções oriundas da extrusora entre dois rolos. A temperatura do composto é mantida, sendo que em caso de necessidade este moinho poderá armazenar borracha.

- **Moinho de alimentação**

O moinho de alimentação assemelha-se à componente anterior, continuando o processo uniformização da borracha e mantendo a temperatura, distinguindo-se pela execução do corte do composto em quatro tiras que abastecem a calandra. O fluxo de entrada de composto é regulado por este elemento através da alteração da velocidade, espessura e largura das tiras.

- ***Let off***

Este componente está unicamente associado ao processamento de material têxtil, em que os rolos provenientes de indústria têxtil são colocados para abastecer a calandragem. A tensão do material é regulada conforme as especificações. Adjacente ao *let off*, existe uma prensa hidráulica com o intuito de efetuar as emendas entre rolos de têxtil, possibilitando a transformação dos rolos individuais em um rolo contínuo.

- **Estufa**

Ligada à preparação do matéria-prima têxtil, a estufa é responsável por elevar a temperatura do material têxtil. Conseqüentemente, vestígios de humidade nos filamentos são eliminados, a sua maleabilidade é incrementada e a superfície é preparada para maximizar a aderência borracha-têxtil.

- **Buffers**

Na calandragem existem dois *buffers*, um têxtil e um do produto calandrado. A função dos *buffers* é armazenar temporariamente os respetivos materiais em situações como a realização de paragens não programadas, emendas ou corte da tela no *wind up*. Estes são constituídos por um conjunto de rolos em que o material efetua um percurso em “S”. Quando atuados, a estrutura move-se no sentido vertical (desce/sobe dependendo da configuração), movendo aproximadamente metade dos rolos, aumentando o curso do material.

- **Rolos de arrefecimento**

As temperaturas da tela calandrada pós-calandragem variam entre de 80 a 90°C, sendo necessário para o armazenamento do material que a temperatura desça para a ordem dos 25°C. Desta forma, próximo da calandra encontram-se os rolos de arrefecimento, onde a tela segue um trajeto em “S” por rolos arrefecidos a água, provocando a diminuição da temperatura e solidificando a forma do material.

- **Wind up**

O último constituinte do processo de calandragem é o *wind up*, composto por dois sistemas paralelos de enrolamento móveis. Neste elemento, a tela calandrada é enrolada em *linner's*, efetuando-se o corte do material no comprimento especificado. Quando concluído um rolo, a estrutura move para iniciar o enrolamento do próximo rolo, maximizando os tempos do processo. O sistema permite ainda controlar a tensão da tela durante o enrolamento.

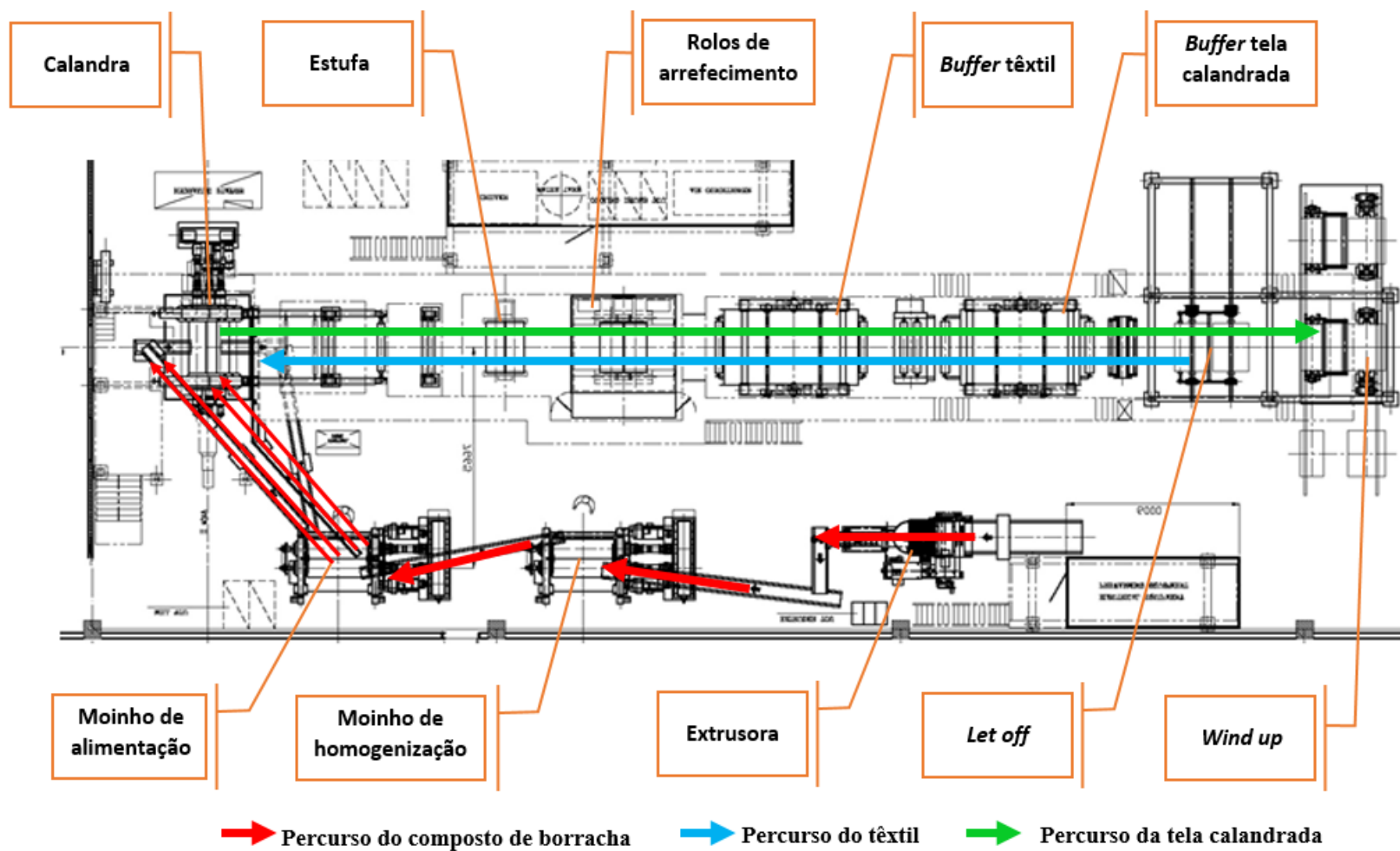


Figura 6 – Esquemática do processo de calandragem (adaptado Continental).

### 3.3 Tela têxtil

Produto do processo de calandragem, a tela têxtil (ver Figura 7) também denominada como tecido calandrado, é constituído por uma camada de têxtil e duas camadas de composto de borracha, sendo aplicado na carcaça do pneu como mencionado anteriormente.

Na Continental Mabor, o material têxtil é formado por quatro tipos de filamentos, entre eles o poliéster, o *rayon*, o *nylon* e a aramida, podendo ainda existir dentro de cada tipo diferentes composições de filamentos.

Os filamentos integrantes de fios são entrelaçados aos pares em espiral, formando uma corda (ver Figura 7) com diâmetros entendidos entre 0,5mm a 0,9mm. Posteriormente a este processo, as cordas são tecidas com cordas transversais de menor diâmetro, para manter o espaçamento entre elas, concebendo um rolo contínuo com uma largura de aproximadamente 1500mm. Em seguida, são mergulhadas num banho de substâncias com o intuito de melhorar as ligações entre a borracha e o têxtil bem como proteger dos filamentos. O processo termina no corte do material em comprimentos especificados, formando rolos individuais (rolo em verde) que serão matéria-prima da calandragem.

Em ambas as superfícies da tela têxtil são colocados fios de algodão (*bleeders*) a sensivelmente 30mm de distância. A sua função é conduzir para o exterior o ar e humidade presentes entre a tela e outros componentes do pneumático, na fase da vulcanização. Os *bleeders* são normalmente de cor branca, exceto aqueles que são utilizados para identificação adicional do têxtil calandrado, respeitando um código de cores em função do tecido calandrado.

O tecido calandrado deve ser dotado de um conjunto de propriedades de forma a garantir a qualidade do pneumático e a não causar problemas noutras fases do sistema produtivo. Assim, a tela têxtil deve possuir a espessura e largura especificadas, com uma baixa variação destas características, ter capacidade de interligação entre borracha-têxtil (adesão em verde ou *green-adhesion*) e borracha-material

(adesividade), assim como uma tensão adequada do material têxtil e um espaçamento entre cordas correto.

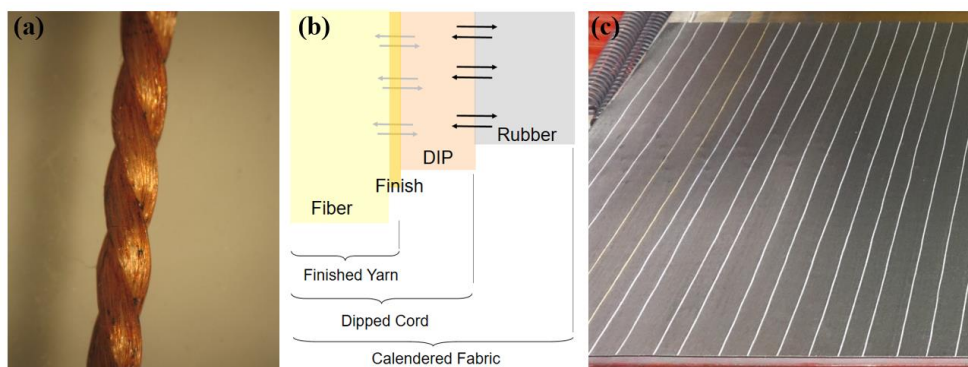


Figura 7 – (a) Corda de poliéster ao microscópio com fator de ampliação x20; (b) Esquematização do tecido calandrado em corte (fonte Continental); (c) Aspetto final do tecido calandrado.

Procurando entender quais os parâmetros da calandragem com impacto nas propriedades do tecido calandrado, por deliberação da empresa, apenas foram abordadas três características:

- **Espessura**

A espessura é uma das propriedades dimensionais da tela têxtil, dependendo esta da espessura das camadas de borracha e do diâmetro do têxtil. Como referido anteriormente, vários sistemas de controlo dos rolos são utilizados para conseguir uma baixa variação no perfil. Um sistema de medição dimensional implementado na zona da pós-calandragem (ver Figura 8), funciona como *feedback* do processo, analisando e corrigindo o posicionamento dos rolos.

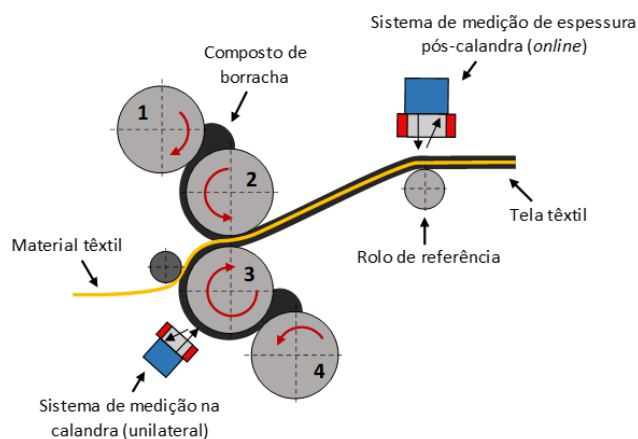


Figura 8 – Sistema de medição de espessura pós-calandra (*online*) (adaptado Petra [5]).

Manualmente é realizada uma inspeção adicional pelos operadores da calandragem (ver Figura 9), através de um perfilómetro, quando o processo se encontra estabilizado após a introdução de um novo material. O objetivo da medição passa por perceber, em modo *offline*, se a espessura cumpre a medida especificada. Para isso, são cortadas três porções circulares na zona das extremidades e centro, e concretizadas duas ou mais medições a cada fração, procedendo ao registo da informação para fins de controlo da produção.

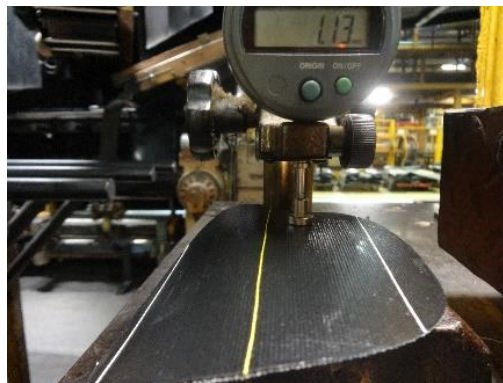


Figura 9 – Sistema de medição manual (*offline*).

- ***Green-Adhesion***

Esta propriedade define-se pela capacidade de interligação entre o composto de borracha e o têxtil, traduzindo-se numa força resistiva à separação de ambos os materiais. Na calandragem não existe nenhum sistema de medição ou correção deste atributo da tela calandrada, identificando apenas o problema no processo seguinte ou até mesmo quando o pneumático se encontra construído.

O plano de controlo do *green-adhesion* passa pela realização de testes periódicos aos tecidos calandrados, bem como a material identificado como não conforme. Os ensaios de adesão (ver Figura 10) são executados num “tensómetro” (equipamento de ensaios de tração) equipado com garras pneumáticas. Em laboratório são testados pelo menos 5 fios de 3 a 5 provetes devidamente preparados.

### ▪ Adesividade

Muito semelhante do conceito anterior, a adesividade é a capacidade de resistência à separação entre dois materiais, como metal-borracha e borracha-borracha. Porém, esta propriedade é uma característica externa, presente em todos os constituintes do pneu. Desenvolvimentos no processo de calandragem permitiram adicionar um sistema de diminuição de adesividade da tela, sendo que a medição desta característica apenas é efetuada em ambiente laboratorial.

Por forma a garantir e controlar este atributo, são também executados ensaios laboratoriais periodicamente e em caso de inconformidades. A medição de adesividade é obtida por um dinamómetro (ver Figura 10) fixado a uma estrutura móvel sobre a pressão de 1,5 bar durante 1 segundo. Para o tecido calandrado são preparadas cinco amostras das extremidades e do centro do material.

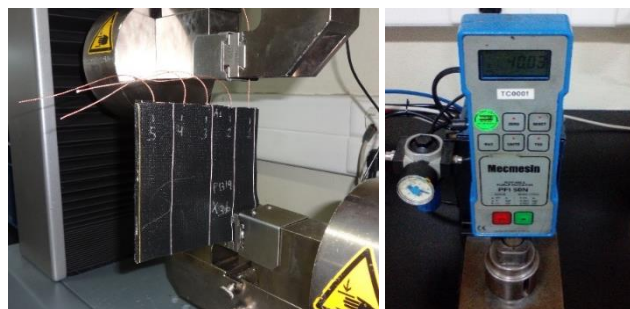


Figura 10 – Ensaio de *green-adhesion* (Continental) e medidor de adesividade.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 INTRODUÇÃO

4.2 CORRELAÇÃO DE SPEARMAN

4.3 MÉTODO DE TAGUCHI

4.3.1 PLANEAMENTO DE EXPERIÊNCIAS

4.3.2 CONSTRUÇÃO DE MATRIZES ORTOGONAIS

4.3.3 ANÁLISE DE RESULTADOS



## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Introdução

O presente capítulo destina-se à revisão da bibliografia sobre a metodologia científica que constituiu a base para o desenvolvimento do estudo proposto.

Nesta secção será introduzida uma breve referência sobre as correlações, abordando a metodologia segundo Spearman. Posteriormente, incidir-se-á sobre conceitos que integram o Método de Taguchi, dando uso a esta metodologia para o planeamento e análise de experiências.

### 4.2 Correlação de Spearman

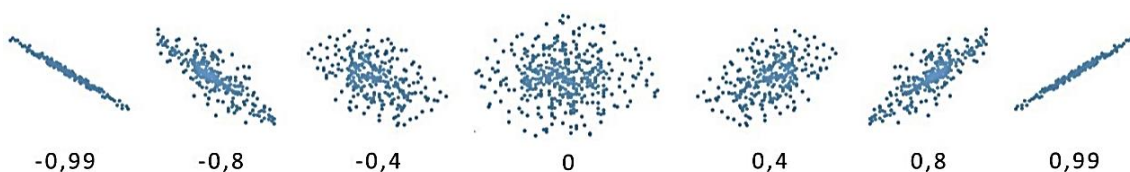
Durante a concretização de um estudo, investigadores são muitas vezes expostos a problemas onde necessitam de comparar duas ou mais variáveis, procurando observar e quantificar a relação entre estas.

Com esse propósito, em 1888, o estatístico Francis Galton introduz pela primeira vez o conceito de coeficiente de correlação. O coeficiente de correlação mede a força da relação linear entre duas variáveis quantitativas, representado por  $r$ . [6]

Geralmente, um coeficiente de correlação positivo significa que o incremento do valor de uma variável irá traduzir-se no aumento do valor da outra variável. Por outro lado, um coeficiente de correlação negativo manifesta a relação inversa das variáveis. [6, 7]

Os coeficientes de correlação compreendem-se no intervalo de -1 a 1 inclusive, onde coeficientes próximos destes valores revelam uma relação quase perfeita entre os fatores em comparação [7]. A utilização de gráficos de dispersão permite a análise visual da relação dos fatores, como ilustrado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Representação dos coeficientes de correlação através da dispersão de pontos.



Atribuíram-se ainda denotações qualitativas para determinados intervalos dos coeficientes [8], considerando-se:

- Correlação nula – intervalo  $[-0,2;0,2]$ ;
- Correlação fraca – intervalos  $]-0,5;-0,2]$  e  $[0,2;0,5[$ ;
- Correlação moderada/média - intervalos  $]-0,8;-0,5]$  e  $[0,5;0,8[$ ;
- Correlação forte – intervalos  $]-1;-0,8]$  e  $[0,8;1[$ .

No entanto, a correlação não deverá ser associada diretamente a um fenômeno de causa-efeito, uma vez que as variáveis observadas poderão ser afetadas por um fator comum [6]. A título exemplificativo, o aumento da produtividade e a redução dos custos de produção poderão apresentar uma correlação negativa, mas não garantindo uma dependência entre ambos, visto que uma gestão eficiente condicionará este acontecimento.

Mais tarde, Spearman propôs uma abordagem por *ranks*, analisando a informação de uma forma indireta. Este método requer uma menor complexidade matemática, mostrando-se mais robusto na presença de *outliers* e permitindo a análise de pequenas amostras.

O cálculo do coeficiente de Spearman ( $r_s$ ) inicia-se pela transformação dos dados de uma variável em valores ordinais, previamente ordenados, repetindo o processo para a segunda variável. Posto isto, é aplicada a equação matemática [7] expressa da seguinte forma:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2-1)} \quad (1)$$

onde,

- $r_s$  é o coeficiente de correlação de Spearman;
- $d$  é a diferença entre *ranks* das variáveis em comparação;
- $n$  é o número de observações.

Tabela 1 – Exemplo de transformação de dados para casos com valores duplicados.

x	y	Rank <sub>x</sub>	Rank <sub>y</sub>
1,1	25	1	1
1,5	33	2	<del>2</del> 3
2,1	33	3	<del>3</del> 3
2,8	33	4	<del>4</del> 3
3,3	42	5	5
4,8	55	6	6
7,2	68	<del>7</del> 7,5	7
7,2	74	<del>8</del> 7,5	8
8,4	88	9	9

Para dados com valores iguais é indicado conceder o valor médio dos *ranks* obtidos. Na Tabela 1 é demonstrado um caso no qual se registaram dois resultados de 7,2 da variável x, correspondentes aos *ranks* 7 e 8, atribuindo-se o *rank* de 7,5 para ambas as observações.

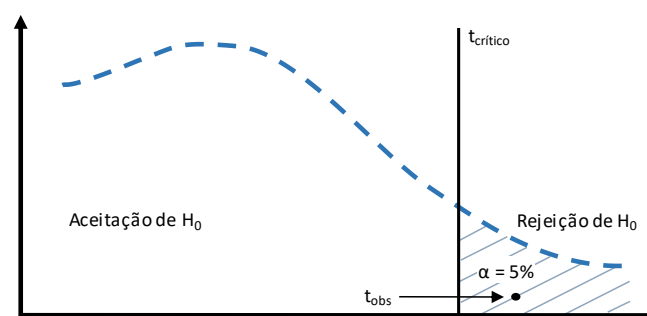
Por fim, um teste *t* é conduzido de forma a determinar se as correlações entre os fatores é significativa. Duas hipóteses são formuladas, a hipótese nula ( $H_0$ ), assumida como verdadeira para o estudo, e a hipótese alternativa ( $H_1$ ) [7]:

$$H_0: r_s = 0 \text{ (não existe correlação)}$$

$$H_1: r_s \neq 0 \text{ (existe correlação)}$$

No teste de hipóteses é estabelecido um nível de significância ( $\alpha$ ), do qual será definida a região crítica (ver Gráfico 2), onde a hipótese nula é rejeitada e consequentemente a hipótese alternativa é aceite. O investigador deve considerar as características do caso de estudo para definir o nível de significância. Na ausência de conhecimento sobre que valor adotar é recomendado a aplicação de  $\alpha = 0,05$  (5%).

Gráfico 2 - Teste de hipóteses unilateral com nível de significância de 5% (adaptado Correia [9]).



As hipóteses são testadas a partir da comparação do valor de  $t$  observado ( $t_{obs}$ ) com o valor crítico ( $t_{crítico}$ ). A hipótese nula será rejeitada quando o valor de  $t_{obs}$  é menor ou igual ao  $t_{crítico}$ . O valor de  $t$  observado é conseguido através da expressão [7]:

$$t_{obs} = r_s \sqrt{\frac{n-2}{1-r_s^2}} \quad (2)$$

O valor crítico é determinado com base na tabela da distribuição  $t$ , delimitado pelo nível de significância adotado para o estudo e pelos graus de liberdade ( $df$ ), conceito abordado no subcapítulo 4.3.3.

### 4.3 Método de Taguchi

Nascido no Japão, Genichi Taguchi contribuiu amplamente para a evolução dos conceitos no âmbito da qualidade dos produtos e processos industriais, através da sua filosofia e métodos. Para Taguchi, a qualidade define-se como as perdas geradas para a sociedade desde o momento em que o produto é expedido para o consumidor. [10, 11]

A sua filosofia transformou a forma como as organizações encararam o controlo da qualidade nas suas indústrias transformadoras, criando uma nova geração de engenheiros focados em pensar e viver qualidade.

Na década de 1980, algumas empresas conceituadas como *AT&T Bell Laboratories*, *Ford Motor Company* e *Xerox* [12] aplicaram a sua doutrina, que segundo Roy [13] se baseia em três simples e fundamentais conceitos:

- A qualidade deve ser projetada para o produto e não para a inspeção do mesmo;
- A melhor forma de alcançar a qualidade é minimizar os desvios em relação ao valor alvo. O produto deve ser delineado para ser imune a incontrolláveis fatores ambientais;
- O custo da qualidade deve ser medido em função dos desvios em relação ao standard enquanto que as perdas devem ser medidas em todo o sistema.

Baseando-se nestes conceitos, Taguchi desenvolveu métodos com o propósito de otimizar os processos de engenharia para a realização de experiências, dado que o seu conceito provocou um poderoso progresso na ideologia da qualidade [13]. Esta técnica ficou conhecida como “Método de Taguchi” ou “Projeto Robusto”, tendo vindo a ser aplicada com sucesso em diversas áreas como mecânica, eletrónica, química, medicina, entre outras. [10, 13, 14]

O Projeto Robusto consiste na elaboração de um produto ou processo capaz de funcionar adequadamente sob as distintas condições de uso [14], isto é, que não seja sensível a variações de fatores que introduzem ruído no sistema [10]. Para alcançar a robustez, o controlo da qualidade deve iniciar-se durante a conceção do produto, continuando pela criação do processo (*off-line quality control*) e, posteriormente, pela produção do produto (*on-line quality control*).

De acordo com Phadke [15], Genichi Taguchi definiu um programa de três passos para obter a qualidade desejada:

- **Projeto do sistema** (*system design*)

Neste passo, são avaliados variados conceitos, ideias, estruturas e tecnologias, de forma a conseguir a função desejada para o produto, selecionando de seguida aqueles que mais se adequam ao mesmo. Este é o passo mais criativo onde a experiência e as aptidões do responsável são determinantes para a otimização do produto.

O projeto do sistema pode desempenhar um importante papel na redução da sensibilidade aos fatores incontrolláveis e na diminuição dos custos de produção. Exemplo desta atividade é a seleção apropriada de diagramas de circuitos ou da sequência de produção.

- **Projeto de parâmetros** (*parameter design*)

O projeto de parâmetros tem como foco a determinação das melhores configurações do sistema nos seus fatores controláveis. Estes não devem ter influência nos custos de produção quando alterados, sendo procuradas as

configurações que minimizam as perdas de qualidade. Com esse intuito, os efeitos dos fatores não controláveis do sistema devem ser reduzidos, direcionando o valor médio da característica para o valor-alvo.

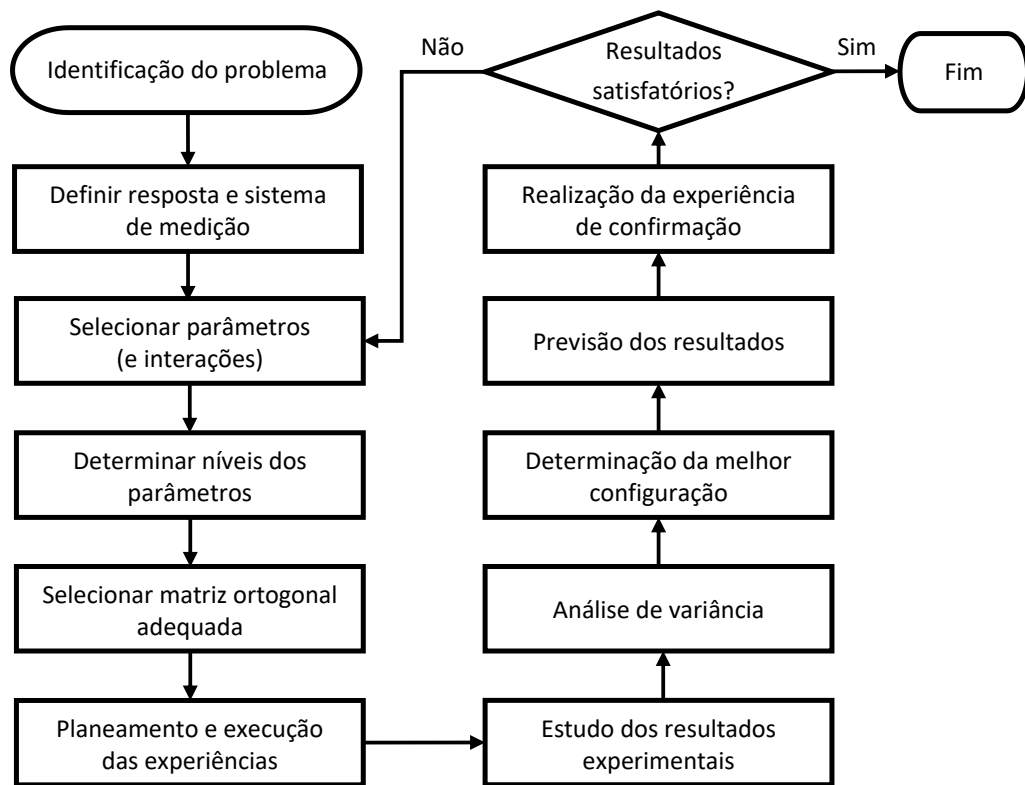
Durante este passo devem ser utilizadas componentes/matérias de menor qualidade sobre as condições dos testes, reduzindo o custo e a sensibilidade no fabrico. Concluída esta etapa, deverá ser conseguido um *design* com o menor custo para a entidade e com valores dentro das especificações, não sendo necessário o projeto de tolerâncias. Na prática, as perdas da qualidade são minimizadas e não eliminadas pelo que, o uso do próximo passo poderá reduzir as perdas.

- **Projeto de tolerâncias** (*tolerance design*)

Encerrando o programa, a ideologia do projeto de tolerâncias fundamenta-se na diminuição das perdas da qualidade através do incremento da variação do desempenho e do custo de produção. Seletivamente são reduzidas as tolerâncias e aplicados materiais de maior qualidade segundo a relação eficácia-custo. Este passo deve apenas ser realizado após o projeto de parâmetros, pois, de outra forma, seriam aplicados desnecessariamente materiais/componentes de maior qualidade.

Por vezes, a variação do produto pode ser limitada através de mecanismos adicionais, como os de feedback, devendo ser considerados durante a realização deste passo.

Gráfico 3 - Fluxograma do Método de Taguchi.



Taguchi identificou um conjunto de etapas necessárias para a realização das experiências com o objetivo de estudar a influência dos parâmetros e interações relativas ao produto ou processo em análise. Após consultar as referências [10, 12-16] foi possível elaborar a sequenciação do Método de Taguchi (ver Gráfico 3).

Sucintamente, as etapas podem ser agrupadas em três fases, a primeira dedicada à análise do sistema, identificando-se o problema assim como as respostas e técnicas de medição das características. Numa segunda fase, procede-se à construção e planeamento das experiências, através da seleção de parâmetros, dos seus níveis e da matriz ortogonal apropriada, culminando na realização dos ensaios. Por fim, uma terceira fase de estudo dos resultados dá uso à análise de variância (ANOVA), análise de médias e da relação sinal-ruído. Caso os resultados obtidos não correspondam ao esperado, deve ser iniciado o processo na segunda fase introduzindo/modificando os parâmetros e níveis.

#### 4.3.1 Planeamento de experiências

A técnica de definição e investigação de um conjunto de condições em experiências envolvendo múltiplos fatores é designada como planeamento de experiências (DOE) [13]. Esta tem a finalidade de determinar a relação entre as variáveis do sistema e a resposta gerada pela alteração das mesmas. [14]

O planeamento de experiências foi desenvolvido por Ronald Fisher, na década de 1920, na Inglaterra, sendo inicialmente aplicado em estudos de experiências na agricultura. Com este método foram determinados, com sucesso, os tratamentos ideais para o solo de forma a maximizar o seu rendimento. Mais tarde, este conceito foi aplicado em várias áreas, especialmente nas indústrias química e farmacêutica. [13, 14]

Tradicionalmente, as experiências conduzidas baseavam-se na alteração de apenas um fator de cada vez, mantendo-se fixas todas as restantes condições relativas ao produto ou processo [14]. Esta metodologia apresenta-se ineficiente e dispendiosa em grande parte dos objetos de investigação [10] devido ao sistema em análise e fatores (ou parâmetros [15]) selecionados. Ross [16] menciona que o uso desta abordagem se deve à ausência de conhecimento dos *designers* sobre estratégias adequadas e eficientes para a execução de experiências.

Ao estruturar um teste e uma estratégia de desenvolvimento, um processo lógico simples passa por estabelecer todas as possíveis combinações entre os valores permitidos dos fatores, denominando-se por “Fatorial completo de experiências”. Naturalmente, os investigadores são expostos a problemas complexos onde um grande número de parâmetros e suas interações são associados ao *output* do sistema em estudo, tornando a observação dessas combinações proibitivamente exequível. [13]

O fatorial completo tem um mínimo de  $2^f$  ( $f$  - número de fatores com dois níveis) possíveis combinações a ser ensaiadas, justificando-se a sua aplicação quando poucos parâmetros estão a ser analisados [16]. A título de exemplo, para uma experiência envolvendo sete fatores (A, B, C, ..., G), cada um com dois níveis, o número total de

combinações seria de 128 ( $2^7$ ). Como demonstrado na Tabela 2 cada célula em branco representa uma experiência, onde a primeira célula ilustra a experiência com os parâmetros nos níveis A1, B1, C1, D1, E1, F1, G1. [13]

Tabela 2 – Fatorial completo de experiências (adaptado Ross [16]).

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E1	F1	G1																
		G2																
	F2	G1																
		G2																
E2	F1	G1																
		G2																
	F2	G1																
		G2																

Procurando reduzir o número de experiências para um valor praticável, somente um pequeno número de combinações é selecionado do total das possibilidades. O método de selecionar um limitado número de ensaios que forneça a maior quantidade de informação é conhecido como fatorial fracionado de experiências (FFE). [13]

As FFEs podem adotar as representações  $\frac{1}{2}$  FFE,  $\frac{1}{4}$  FFE e  $\frac{1}{8}$  FFE (ver Anexo A), onde determinadas condições de tratamento são utilizadas de forma a manter a independência ao longo dos vários parâmetros e interações. [16]

Com vista à melhoria deste processo, Taguchi desenvolveu uma abordagem baseada no planeamento de experiências de forma a reduzir o número de ensaios a realizar. Esta abordagem dá uso ao conceito de fatores de ruído, sendo os restantes parâmetros interligados ao produto/processo (ver Figura 11).

Compreende-se por “fatores de sinal” aqueles que são configurados pelo utilizador ou operador do produto para conseguir a resposta esperada, sendo selecionados durante o desenvolvimento do produto com base no conhecimento em engenharia. Exemplos deste tipo de parâmetros são o ângulo de rotação do volante que determina o raio de viragem do automóvel ou botão do rádio para definir uma frequência. [15]

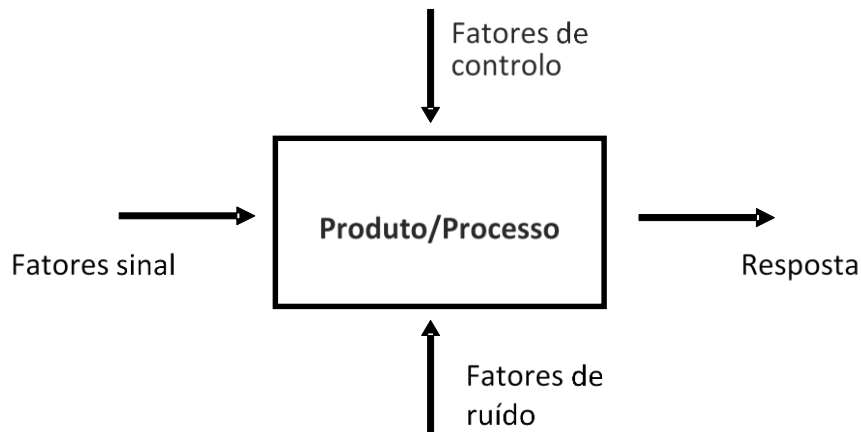


Figura 11 - Diagrama de bloco representativo de um produto/processo (adaptado Phadke [15]).

Os “fatores de ruído” são os parâmetros que não são possíveis de controlar ou eliminar, incluindo ainda os fatores de difícil controlo no sistema real ou aqueles em que as configurações (ou níveis) dos ensaios são dispendiosas. O ruído introduzido por estes gera um desvio da resposta do sistema em relação ao valor alvo esperado pelo sinal, criando perdas de qualidade.

De acordo com Phadke [15] estes parâmetros de ruído subdividem-se em três categorias:

- **Exteriores** – O meio ambiente envolvente do produto e a exposição a este são das principais causas de variação da função do produto. Exemplo destes fatores são a temperatura, humidade, interferências eletromagnéticas, vibrações, falha humana, entre outros.
- **Unidade para unidade** – Como nenhum sistema é ideal, a existência de variação do processo é inevitável, transformando-se esta na variação das características de produto para produto. Deste modo, valores especificados podem ser afetados como por exemplo a produção de resistências com um valor-alvo de 100 ohms gerar resistências de 101 ou 99 ohms.
- **Deterioração** – Ao longo do tempo as características dos produtos podem sofrer alterações, devido as propriedades dos mesmos, causando perda da sua qualidade.

Denominam-se “fatores de controlo” aqueles que podem ser especificados livremente pelo responsável do estudo. O investigador tem como responsabilidade determinar os melhores valores para estes parâmetros em relação às características desejadas, por forma a alcançar a robustez do produto/processo. [10, 15]

Dehnad [10] acrescenta uma categoria de fatores de nivelamento/escala, referindo-se a estes como casos especiais de fatores de controlo que são facilmente ajustados, de forma a conseguir a relação pretendidas entre o *input* e *output* do sistema.

#### 4.3.2 Construção das matrizes ortogonais

Ainda que conhecido o fatorial fracionado, não lhe é associada nenhuma forma de aplicação ou de análise dos resultados obtidos. A abordagem de Taguchi complementa estas duas importantes áreas, pois são definidas por ela um conjunto de matrizes para aplicação assim como uma metodologia para analisar os resultados. [13]

Genichi Taguchi elaborou um grupo especial de FFEs que cobrem inúmeras aplicações experimentais, com base num conjunto de matrizes ortogonais, permitindo encontrar o menor número de experiências a executar para um determinado número de fatores (ver Tabela 3) [13]. Com esta estrutura, é obtida uma maior quantidade de informação precisa do que conduzindo experiências de um fator de cada vez. [10]

A ortogonalidade das matrizes permite que os parâmetros sejam avaliados independentemente um dos outros, isto é, o efeito de um parâmetro não interfere a estimação do efeito de outro parâmetro. Esta característica é conseguida através do balanceamento dos ensaios, existindo um igual número de amostras sobre as várias condições de tratamento. [16]

Tabela 3 – Comparação entre o Fatorial completo e Método de Taguchi (adaptado Roy [13]).

Fatores	Níveis	Número de experiências	
		Fatorial completo	Taguchi
2	2	4 ( $2^2$ )	4
3	2	8 ( $2^3$ )	4
4	2	16 ( $2^4$ )	8
7	2	128 ( $2^7$ )	8
15	2	32768 ( $2^{15}$ )	16
4	3	81 ( $3^4$ )	9

A simbologia que designa as matrizes ortogonais de Taguchi descreve essencialmente a dimensão das experiências, com a configuração de  $L_k$  ou  $L_k$ , onde  $k$  representa o número de ensaios a realizar [13]. As matrizes ortogonais dividem-se em três categorias: as séries com dois níveis como  $L_4(2^3)$ ,  $L_8(2^7)$ ,  $L_{12}(2^{11})$ ; as séries com fatores a três níveis como  $L_9(3^4)$ ,  $L_{27}(3^{13})$ ,  $L_{81}(3^{40})$ ; e as séries com níveis diferentes (níveis-mistos) como  $L_{18}(2^1 \times 3^{13})$  ou  $L_{36}(2^3 \times 3^{13})$ . [14]

Antes da construção das matrizes ortogonais, um conhecimento aprofundado do produto/processo é crucial para a identificação dos fatores e interações que potencialmente influenciam a resposta. De modo a compilar uma lista abrangente de parâmetros são, geralmente, envolvidas todas as partes relacionadas com o projeto [13]. Diversos métodos são úteis para a determinação dos fatores; Taguchi define três [16]:

- Brainstorming;
- Fluxogramas (em especial para processos);
- Diagramas de causa-efeito.

No brainstorming pretende-se reunir o grupo de pessoas associadas ao problema, como os especialistas do processo, operários, responsáveis de processos adjacentes e do tratamento estatístico, solicitando informação relevante a ser investigada.

Com maior foco para processos, os fluxogramas adicionam alguma estrutura à análise do sistema, evitando a omissão de fatores importantes.

Os diagramas de causa-efeito permitem investigar as possíveis origens primárias, secundárias e terciárias do problema, dos quais cada fator primário é associado a um “ramo” e repartidos por “ramos” secundários, e assim sucessivamente, fluindo para um ramo principal que conduz ao efeito.

Para a seleção de uma matriz ortogonal adequada para o estudo devem ser considerados os graus de liberdade impostos pelos parâmetros/interações

identificados, pelo número de níveis adotados e pelos graus de liberdade da matriz [16]. As noções de graus de liberdade serão aprofundadas no próximo capítulo.

No *layout* de uma matriz ortogonal, cada coluna acomoda um parâmetro/interação em estudo e cada linha define a configuração relativa das experiências, sendo indicado o estado de cada fator para determinado ensaio. O número de colunas de uma matriz ortogonal indica o número máximo de parâmetros que podem ser estudados. [15]

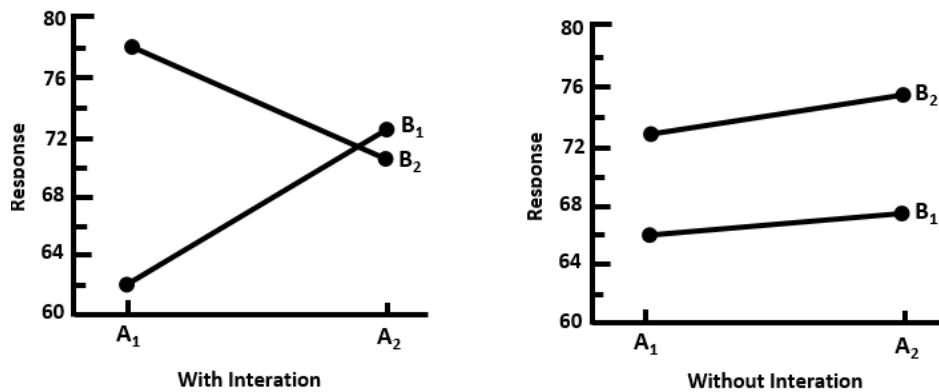
Uma matriz ortogonal L8 é apresentada na Tabela 4, na qual a representação dos níveis é realizada pela numeração 1 (nível baixo) e 2 (nível alto). Outros símbolos poderão ser observados como + e – ou -1 e 1 respectivamente [12], substituindo-se posteriormente por valores reais dos fatores por forma a diminuir os erros experimentais [14].

Em conjugação com a matriz referida é representada na Tabela 4 a abordagem de Taguchi do *parameter design* com a presença de duas matrizes ortogonais: uma interna relativa aos fatores de controlo e uma externa relativa aos fatores de ruído. Quando conhecidos os parâmetros de ruído, uma forma eficaz de analisá-los passa por conduzir experiências, forçando estes fatores a um nível específico, assim poderá ser investigada com maior precisão a influência destes no sistema tal como dos fatores de controlo. [16]

Tabela 4 – Matriz ortogonal L8 interna e L4 externa (adotado Ross [16]).

Experiência	Matriz ortogonal L8 interna (fatores de controlo)							Matriz ortogonal L4 externa (fatores de ruído)						
	A	B	C	D	E	F	G	Z	Y	X	Dados			
											Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	*	*	*	*
2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	*	*	*	*
3	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	*	*	*	*
4	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	*	*	*	*
5	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2	*	*	*	*
6	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	*	*	*	*
7	2	2	1	1	2	2	1	2	2	2	*	*	*	*
8	2	2	1	2	1	1	2	2	2	2	*	*	*	*

Gráfico 4 – Identificação gráfica da interação entre o fator A e B (adaptado Roy [13]).



Durante a elaboração das experiências, a introdução de interações nas matrizes ortogonais requer determinados cuidados. A terminologia de interação é representada por “x” entre dois fatores (por exemplo: AxB), descrevendo a condição em que a influência de um fator no resultado é dependente de outro fator. [13]

Graficamente (ver Gráfico 4) a existência de interações pode ser revelada através da inclinação das retas da resposta do estudo, isto é, se a linha formada entre o resultado da  $A_1B_1$  e  $A_2B_1$  não for paralela à linha entre o resultado  $A_1B_2$  e  $A_2B_2$  então os fatores podem interagir [13]. Esta informação auxiliará na fase de análise dos resultados do estudo.

Genichi Taguchi definiu duas ferramentas para alocação de interações e respectivos parâmetros [16]:

- **Tabelas triangulares**

Desenvolvidas por Taguchi, as tabelas triangulares de interações ou apenas tabelas de interações incluem toda a informação relevante sobre a atribuição de fatores [15]. Estas simplificam a alocação dos parâmetros, reduzindo o tempo e aumentando a precisão desta atividade. [13]

As tabelas triangulares apresentam uma lista de todas as possíveis colunas com interação que existem numa determinada matriz ortogonal [16]. A interpretação das tabelas triangulares baseia-se na identificação da intersecção entre duas colunas, por exemplo coluna 1 e 2 (ver Tabela 5), é indicado que a coluna 3 reflete

a interação entre as duas colunas. Da mesma forma, a interação entre a coluna 2 e 3 é expressa na coluna 1, assim como a interação entre 1 e 3 é associada à coluna 2. [13]

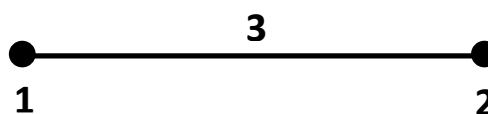
Tabela 5 – Tabela triangular da matriz ortogonal L8 (adaptado Phadke [15]).

Coluna	1	2	3	4	5	6	7
1	(1)	3	2	5	4	7	6
2		(2)	1	6	7	4	5
3			(3)	7	6	5	4
4				(4)	1	2	3
5					(5)	3	2
6						(6)	1
7							(7)

#### ▪ Gráficos lineares

Os gráficos lineares apresentam a informação das interações graficamente e facilitam a atribuição dos parâmetros e interações pelas várias colunas das matrizes ortogonais. Nos gráficos lineares, as colunas são representadas por pontos e as interações por linhas, sendo que a numeração associada aos pontos/linhas é representativa da coluna disponível para a alocação na matriz ortogonal (ver Gráfico 5). [15]

Gráfico 5 – Gráfico linear da matriz ortogonal L4.

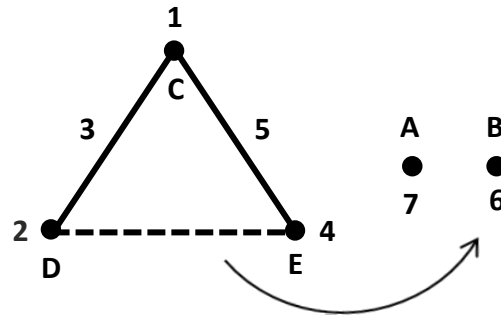


A complexidade dos gráficos aumenta com a inserção de um maior número de parâmetros, tal como o número de configurações que os mesmos adotam (ver Anexo B). Contudo, inúmeros casos reais não se ajustam aos gráficos lineares *standard* mencionados até ao momento, tornando-se essencial proceder a modificação dos gráficos para simplificar a atribuição dos fatores às colunas. [15]

Para o exemplo de um estudo onde se pretende investigar os fatores (A, B, C, D, E) e as interações (C×D e C×E), usando o gráfico linear da matriz ortogonal L8 (ver

Gráfico 6), será necessário retirar a interação  $D \times E$ , tornando disponível para a atribuição do parâmetro B. Inerente a esta modificação, o efeito do fator conferido à coluna 6 será confundido com a interação de  $D \times E$ .

Gráfico 6 – Gráfico linear modificado L8 (adaptado Ross [16]).



No entanto, a atribuição de parâmetros a determinadas colunas conduz a que os efeitos dos fatores sejam confundidos por interações de outros fatores, deste modo foram nomeados graus de resolução das experiências (ver Anexo C) que identificam o que poderá ser verificado numa experiência [16]. Autores [13, 14] mencionam que as matrizes ortogonais aumentam a sua eficácia na ausência interações significativas entre fatores.

Uma forma de diminuir a influência das interações nos efeitos dos parâmetros passa por seleccionar colunas com interações entre múltiplos fatores, devido ao facto de a probabilidade de ocorrerem ser menor, bem como a magnitude será menor nos resultados [16]. Como exposto na Tabela 6, a atribuição de um quarto parâmetro à coluna 7 da matriz ortogonal conduziria a obtenção de melhores resultados dos ensaios.

Tabela 6 - Experiência com resolução 4 (adaptado Ross [16]).

Colunas						
1	2	3	4	5	6	7
A	B	$A \times B$	C	$A \times C$	$B \times C$	$A \times B \times C$

Para o planeamento das matrizes ortogonais devem ainda ser tomados em consideração os conceitos de replicações e repetições para a recolha de resultados,

ambos com o intuito de identificar o erro experimental. A abordagem por replicações consiste na repetição de  $n$  ( $n$  – número estipulado) vezes do conjunto de experiências especificado pela matriz ortogonal de uma forma aleatória. Por sua vez, nas repetições, o conjunto de experiências é também executado de forma aleatória, embora cada experiência seja ensaiada  $n$  vezes para prosseguir para a próxima experiência sem que exista repetição do conjunto. [13]

A aleatoriedade é sugerida por Genichi Taguchi na execução das experiências tendo a finalidade de reduzir a influência dos fatores desconhecidos e não controláveis nos resultados obtidos. Pretende também prevenir que a configuração da experiência antecedente cause alterações no produto/processo que poderão permanecer quando mantidas condições similares dos níveis dos fatores. [16]

#### 4.3.3 Análise dos resultados

A análise de resultados segue-se à realização dos ensaios experimentais, desempenhando um importante papel na determinação da influência dos parâmetros e suas interações no sistema. Segundo Roy [13], a análise dos resultados no Método de Taguchi poderá ter como objetivo:

- Identificar as melhores ou ideais condições para o produto/processo;
- Estimar a contribuição dos parâmetros individualmente;
- Prever a resposta (*output*) sob as configurações ótimas.

Taguchi sugere duas diferentes metodologias para executar a análise completa dos resultados. Na primeira metodologia, a média dos resultados dos ensaios da mesma experiência são processados através do efeito principal e pela análise de variância (ANOVA). Na segunda, fortemente recomendada pelo mesmo para ensaios com replicações ou repetições, os dados são transformados na razão sinal-ruído (S/N), sendo posteriormente processados os valores de igual forma à abordagem anterior. [13]

O efeito principal ou efeito fatorial de um parâmetro, frequentemente denominado por “efeito médio”, permite determinar as condições ótimas do sistema. Este é obtido através da diferença entre efeitos médios um fator de dois níveis. O processo da estimação dos efeitos dos fatores é por vezes designado por análise de médias (ANOM). [13, 15]

O efeito médio de um fator num determinado nível requer pequenas manipulações aritméticas, podendo ser conseguido através da equação seguinte:

$$m_{fator_k} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{fator_k})_i}{N_{fator_k}} \quad (3)$$

onde,

- $m_{fator_k}$  é o efeito médio do fator no nível  $k$ ;
- $N_{fator_k}$  é o número de resultados do fator no nível  $k$ ;
- $(R_{fator_k})_i$  é o resultado experiência  $i$  com o fator no nível  $k$  ( $i=1, \dots, n$ ).

Padke [15] define o efeito de um fator como o desvio que esse mesmo provoca da média total dos resultados, como ilustrado na Figura 12. Nesta ilustração é apresentado o efeito para  $A_1$  (experiências 1, 2, 3),  $A_2$  (experiências 4, 5, 6) e  $A_3$  (experiências 7, 8, 9), bem como para os restantes fatores.

Além do conhecimento das condições ótimas, a informação relativa à contribuição de cada parâmetro na resposta do sistema é relevante para a determinação das modificações adequadas. Com esse fim, o tratamento estatístico mais comum para determinar a percentagem de contribuição é a ANOVA, que será descrito neste documento. [13]

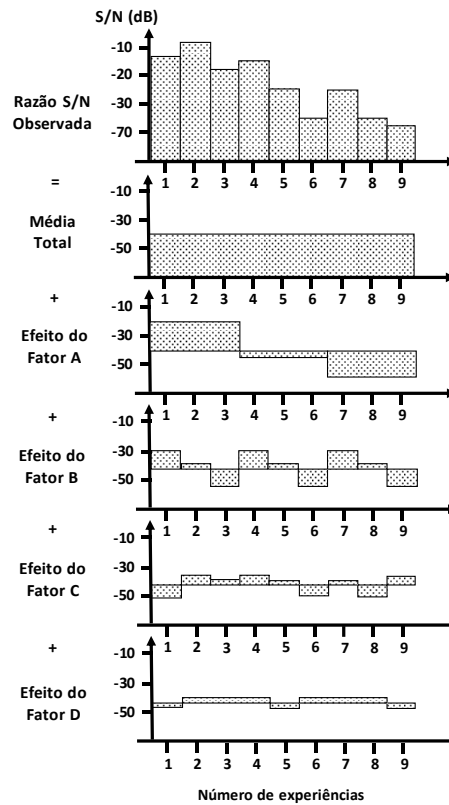


Figura 12 – Decomposição dos efeitos dos fatores dos resultados S/N observados (adaptado Padke [15]).

Por vezes, o estudo de um produto/processo tem como finalidade a alteração das suas características da qualidade. A razão sinal-ruído mede a sensibilidade dessas mesmas características sobre a influência de fatores externos, possibilitando a identificação dos parâmetros que tornam o sistema mais robusto às flutuações provocadas pelos fatores ruído. [13]

#### 4.3.3.1 Razão Sinal-Ruído

A razão sinal-ruído (S/N) tem vindo a ser utilizada pela indústria como uma escala de medição de equipamentos, há aproximadamente uma centena de anos. Esta razão expressa em decibéis (dB) estabelece a magnitude da relação entre o sinal transmitido e o ruído presente no mesmo. Um bom sistema de medição é capaz de captar o sinal sem ser afetado pela influência do ruído. [14]

Genichi Taguchi generalizou o conceito da razão sinal-ruído, aplicando na avaliação dos sistemas de medição, bem como dos produtos e processos.

Os problemas de razão S/N dividem-se em dois tipos: os problemas dinâmicos e os problemas estáticos ou não dinâmicos. No tipo estático, o estudo é dedicado para um

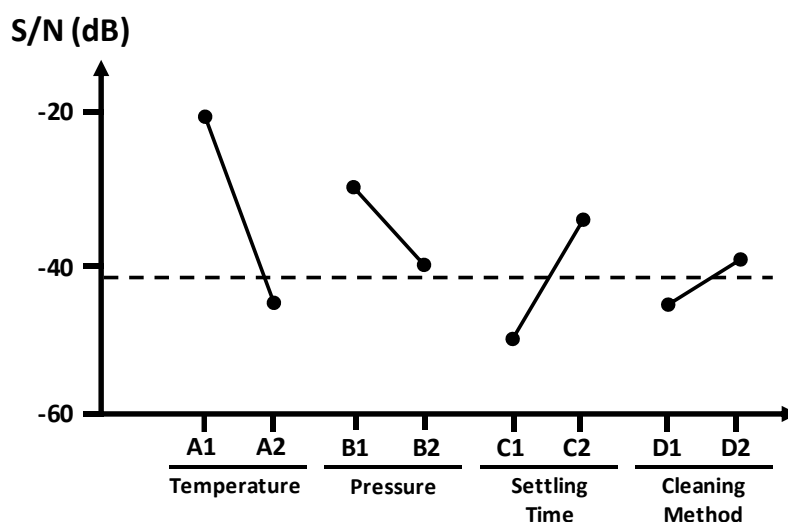
objetivo fixo, tornando trivial o fator sinal, que para propósitos práticos o fator é ausente. Um exemplo deste tipo é um equipamento elétrico com um *output* de 110 Volts (V), onde não existe a necessidade de regular esse valor ao longo do tempo. Em contraste, no tipo dinâmico será necessário ajustar a resposta do sistema para o valor alvo através da variação de um determinado sinal de entrada. Os sistemas controle ou um amplificador elétrico, são exemplos do tipo dinâmico. [14, 15]

Para maximizar a robustez, o objetivo do estudo será selecionar os níveis dos parâmetros de controle com maior valor da razão S/N. Um maior valor desta razão implica que a magnitude do sinal é muito superior à magnitude dos efeitos aleatórios dos fatores ruído. A representação gráfica (ver Gráfico 7) é por vezes utilizada para, visualmente, identificar os níveis que conduzem a uma resposta sinal-ruído de maior valor.

Matematicamente, a razão sinal-ruído consolida múltiplas repetições (pelo menos duas repetições são necessárias) em um único valor, refletindo a quantidade de variação presente. [16]

A resposta observada num estudo da melhoria da qualidade é denominada por característica da qualidade. Existem vários tipos de características da qualidade dos quais, do ponto vista da qualidade, segundo Roy [13] distribuem-se nas categorias menor-é-melhor, nominal-é-melhor e maior-é-melhor.

Gráfico 7 - Efeito médio da razão S/N para cada nível dos parâmetros (adaptado Phadke [15]).



- **Menor-é-melhor (*smaller the better*)**

Na categoria menor-é-melhor (SB), a característica da qualidade é contínua e não negativa, podendo adotar valores de zero a infinito. Neste tipo de característica, o valor desejado é zero, traduzindo na diminuição do valor médio de determinada propriedade. Reduzir a quantidade de impurezas numa substância retrata um problema deste tipo. [15]

Para esta categoria, a transformação de dados dá uso à seguinte formulação:

$$S/N_{SB} = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4)$$

onde,

- $S/N_{SB}$  é a razão sinal-ruído da experiência, em decibéis (dB);
- $n$  é o número de observações da experiência;
- $y_i$  é o valor da observação da experiência  $i$  ( $i= 1, \dots, n$ ).

- **Nominal-é-melhor (*nominal the best*)**

Para problemas do tipo nominal-é-melhor (NB), as características da qualidade repartem-se em dois modelos, dos quais denominaremos como NBT e NBD.

No modelo NBT, a característica é contínua e não negativa, no qual o valor alvo é diferente de zero e finito. Nestes problemas, quando a média é zero, a variância também se torna zero. Alcançar um valor *target* para a espessura de placa de um circuito elétrica ilustra uma aplicação deste modelo. [15]

Contudo, no segundo modelo, a característica poderá adquirir valores positivos e negativos. Normalmente, o valor alvo é zero para esta característica, sendo que no caso de a média ser igual a zero, a variância não se torna zero. Um exemplo da aplicação deste modelo será num estudo sobre diferença do raio de um veio em relação ao seu valor especificado. [15]

As formulações matemáticas dos modelos são descritas da seguinte forma:

$$S/N_{\text{NBT}} = -10 \log_{10} \left( \frac{\bar{y}_i^2}{\sigma_i^2} \right) \quad (5)$$

$$S/N_{\text{NBD}} = -10 \log_{10}(\sigma_i^2) \quad (6)$$

onde,

- $S/N_{\text{NBT}}$  e  $S/N_{\text{NBD}}$  são a razão sinal-ruído da experiência, em decibéis (dB);
- $\bar{y}_i$  é a média dos valores das observações da experiência  $i$  ( $i= 1, \dots, n$ );
- $\sigma_i$  é o desvio-padrão amostral dos valores das observações da experiência  $i$  ( $i= 1, \dots, n$ ).

▪ **Maior-é-melhor (*larger the better*)**

Na categoria maior-é-melhor (LB), as características da qualidade são contínuas e não negativas. Contudo, o valor desejado será o maior possível, aumentando assim o valor médio da propriedade. Um exemplo deste tipo será obter a maior resistência mecânica de uma liga de aço. [15]

A transformação de dados para a categoria maior-é-melhor é formulada por:

$$S/N_{\text{LB}} = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (7)$$

onde,

- $S/N_{\text{LB}}$  é a razão sinal-ruído da experiência, em decibéis (dB);
- $n$  é o número de observações da experiência;
- $y_i$  é o valor da observação da experiência  $i$  ( $i= 1, \dots, n$ ).

#### 4.3.3.2 Análise de variância

A análise de variância (ANOVA) é um método estatístico desenvolvido por Sir Ronald Fisher na década de 1930, utilizado para interpretação de dados experimentais. Esta metodologia não analisa diretamente os dados, apenas determina a variabilidade (variância) dos mesmos. [13, 16]

O propósito da aplicação desta técnica baseia-se em decompor a variabilidade total dos dados, medida através da soma dos quadrados dos desvios em relação ao valor da média, em contribuições de cada fator e do erro nos dados. Para a identificação dos fatores com efeito significativo nas experiências, um teste F é concretizado. [10]

Inerente ao teste F são formuladas duas hipóteses, que de acordo com Dehnad [10], no desenho de experiências as hipóteses testadas são:

$H_0$ : A mudança do nível de um fator não altera a variável resposta.

$H_1$ : A mudança do nível de um fator altera a variável resposta.

Na análise de variância, diversas grandezas como os graus de liberdade, soma dos quadrados, média dos quadrados, entre outros, são computados e organizados num formato tabular standard. Segundo as referências [12, 13, 15, 16], as grandezas e as suas formulações matemáticas são expressas da seguinte forma:

- **Graus de liberdade (*df*)**

Os graus de liberdade (*df*) são uma medida da quantidade de informação que pode ser estimada através de um conjunto de dados. Outra forma de abordar este conceito reside em conceder um 1 *df* para cada comparação que é possível realizar nos dados. Para um fator A com quatro níveis, os dados de A1 podem ser comparados com os dados de A2, A3 e A4, logo existem 3 graus de liberdade.

Graus de liberdade associados ao erro experimental podem ser substituídos por graus de liberdade de fatores, de forma a obter maior quantidade de informação. Quando todos os graus de liberdade disponíveis de uma matriz são associados a fatores, a matriz é designada como matriz saturada. [16]

Matematicamente, os graus de liberdade são calculados por meio das equações:

$$df_{fator} = l - 1 \quad (8)$$

$$df_{interação} = (df_{fator_1}) \times (df_{fator_2}) \quad (9)$$

$$df_{total} = z - 1 \quad (10)$$

$$df_{erro} = df_{total} - \sum(df_{fatores}) \quad (11)$$

onde,

- $df_{fator}$  é o número de graus de liberdade de um fator;
- $df_{fator_1}$  e  $df_{fator_2}$  são os graus de liberdade dos fatores da interação;
- $df_{total}$  é o total de graus de liberdade dos dados;
- $df_{erro}$  é o número de graus de liberdade associados ao erro;
- $l$  é o número de níveis do fator;
- $z$  é o número total de experiências;
- $\sum(df_{fatores})$  é o somatório dos graus de liberdades dos fatores;

#### ▪ Soma dos quadrados (SS)

A soma dos quadrados (SS) é uma medida do desvio dos dados da experiência em relação ao valor médio. Somar os quadrados dos desvios enfatiza o desvio total. [13, 16]

Desta forma, a soma dos quadrados é conseguida através das formulações:

$$T = \sum_{i=1}^z w_i \quad (12)$$

$$S_{fator_k} = (\sum_{i=1}^z fator_k)^2 \quad (13)$$

$$SS_{fator} = \left[ \sum_{k=1}^j \left( \frac{S_{fator_k}}{N_{fator_k}} \right) \right] - \frac{T^2}{z} \quad (14)$$

$$SS_{total} = \sum_{i=1}^z (w_i^2) - \frac{T^2}{z} \quad (15)$$

$$SS_{erro} = SS_{total} - \sum SS_{fatores} \quad (16)$$

onde,

- $T$  é a soma dos resultados das experiências;
- $w_i$  é o resultado da experiência  $i$  ( $i=1, \dots, z$ );
- $S_{fator_k}$  é soma do quadrado dos resultados do fator no nível  $k$  ( $i=1, \dots, z$ );
- $fator_k$  é o resultado da experiência com o fator no nível  $k$ ;
- $N_{fator_k}$  é o número de experiências do fator no nível  $k$  ( $k=1, \dots, j$ ).
- $SS_{fator}$  é a soma dos quadrados de um fator;
- $SS_{total}$  é a soma total dos quadrados;
- $SS_{erro}$  é a soma dos quadrados do erro;
- $\sum SS_{fatores}$  é o somatório da soma dos quadrados dos fatores.

#### ▪ Variância (V)

Uma outra grandeza que é calculada é a variância (V). A variância mede a distribuição dos dados sobre a média dos mesmos. [13, 16]

Aplicando as seguintes expressões matemáticas poderá ser obtida a variância dos fatores e do erro:

$$V_{fator} = \frac{SS_{fator}}{df_{fator}} \quad (17)$$

onde,

- $V_{fator}$  é a variância de um determinado fator (ou do erro).

#### ▪ Razão de variância ( $F$ )

Conhecida por razão de variância ou estatística  $F$  (teste  $F$ ), esta grandeza é utilizada estatisticamente para fornecer uma decisão, a um determinado nível de confiança, quanto ao facto de as estimativas serem significativamente diferentes. No desenho de experiências a finalidade do teste  $F$  é determinar se um parâmetro é significativo para o sistema. [13, 16]

O valor de  $F$  é simplesmente o rácio entre duas variâncias, a do fator e do erro, como demonstrado na seguinte equação:

$$F_{fator} = \frac{V_{fator}}{V_{erro}} \quad (18)$$

onde,

- $F_{fator}$  é o valor da razão de variância do fator em relação ao erro.

A fim de determinar se o parâmetro é significativo, este valor obtido é comparado com o valor do  $F$  crítico ( $F_C$ ) de uma tabela da distribuição  $F$ . As tabelas são organizadas por nível de confiança, em percentagem, definido pelo investigador e pelos graus de liberdade associados ao fator e ao erro, numerador ( $df_1$ ) e denominador ( $df_2$ ) respetivamente.

De acordo com Ross [16], o nível de confiança para um teste pode ser obtido por meio de:

$$\text{Nível de confiança} = 1 - \alpha \quad (19)$$

Como mencionado anteriormente,  $\alpha$  é o nível de significância e expressa o risco associado a rejeitar a hipótese nula quando esta é verdadeira (erro do tipo I). A partir deste é estabelecido o nível de confiança do estudo, assim como a tabela da distribuição F inerente a essa confiança.

Um estudo com 90% de nível de confiança indica um risco de 10%, simbolicamente representado nas tabelas como  $F_{0,10;df_1;df_2}$ . Para o exemplo de um problema com 2 *df* do numerador e 9 *df* do denominador ( $F_{0,10;2;9}$ ), o valor correspondente a  $F_c$  seria 3,01. [16]

Estatisticamente, um valor de  $F$  do fator superior ao  $F_c$  mencionado no exemplo anterior significa que, com pelo menos 90% de confiança, esse fator influencia o valor médio das características em estudo do produto/processo. [13, 16]

▪ **Soma dos quadrados pura ( $SS'$ )**

A soma dos quadrados pura ( $SS'$ ) gera uma aproximação do valor “real” da soma dos quadrados de cada fator. Para tal, é subtraída a variância associado ao erro do estudo por meio da seguinte fórmula:

$$SS'_{fator} = SS_{fator} - (df_{fator} \times V_{erro}) \quad (20)$$

$$SS'_{erro} = SS_{erro} + (\sum df_{fatores} \times V_{erro}) \quad (21)$$

onde,

- $SS'_{fator}$  é a soma dos quadrados pura de determinado fator;
- $SS'_{erro}$  é a soma dos quadrados pura do erro;
- $\sum df_{fatores}$  é o somatório dos graus de liberdade dos fatores incluídos na experiência.

- **Percentagem de contribuição ( $P$ )**

Por fim, a percentagem de contribuição indica a força relativa de cada fator ou interação em relação ao sistema em análise. Se os parâmetros forem controlados de forma precisa, então a variação total poderá reduzir a mesma quantidade indicada pela percentagem de contribuição.

No caso de a percentagem associada ao erro constituir 15% ou menos do total da percentagem é assumido que nenhum dos fatores importantes foram omitidos. Por outro lado, se esse valor for igual ou superior a 50%, então podem ter sido omitidos alguns fatores importantes, as condições não foram controladas precisamente ou o erro de medição foi excessivo. [16]

A percentagem de contribuição é calculada a partir da próxima expressão matemática:

$$P_{fator} = \frac{SS'_{fator}}{SS_{total}} \times 100 \quad (22)$$

onde,

- $P_{fator}$  é a percentagem de contribuição do fator/erro;

Por vezes, em matrizes saturadas e sem repetições, o valor da variância do erro é pequeno ou nulo, incrementando o valor da variância dos fatores. É indicado a realizar o *pooling* dos parâmetros e/ou interações na existência de fatores não significantes, de modo a permanecerem apenas os fatores com influência. [13, 16]

*Pooling* é o processo de desconsiderar a contribuição de fatores selecionados e consequentemente ajustando a contribuição dos restantes, existindo o *pooling up* e *pooling down*. O *pooling up* é recomendado por Taguchi para maximizar o número de fatores considerados significantes. [13, 16]

No *pooling up*, o fator com menor  $SS$  é associado ao erro, e, sucessivamente, são desconsiderados os próximos com valor inferior até que um dos fatores seja significativo. Por outro lado, no *pooling down* todos os fatores são desconsiderados

exceto aquele com maior efeito, e, seguidamente, são considerados os fatores com maior efeito até que um fator dos considerados seja insignificante. [13, 16]

De forma a resumir o método de análise de variância, é apresentado na Tabela 7 um exemplo para o desenho de experiências. A análise do quadro possibilita identificar os fatores com valores reduzidos da soma dos quadrados, estando estes associados ao erro e assinalados com um asterisco (\*). Deste modo, o erro que anteriormente era zero acumulou os graus de liberdade desses fatores bem a soma dos quadrados, ficando apenas os fatores significativos A e B.

Tabela 7 - Exemplo da análise de variância para o desenho de experiências (adaptado Ross [16]).

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Variância	Razão de variância	Soma dos quadrados pura	Porcentagem de contribuição
A	3	45,00	15,00	90,00	44,50	63,60
B	1	24,50	24,50	147,00	24,33	34,80
C*	1	0,00	0,00			
D*	1	0,00	0,00			
E*	1	0,50	0,50			
Erro* (Pooled)	3	0,50	0,17		1,17	1,60
Total	7	70,00			70,00	100,00



# METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

## 5.1 INTRODUÇÃO

## 5.2 RECOLHA DE INFORMAÇÃO

### 5.2.1 PROCESSO PRODUTIVO

### 5.2.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO DA ADESIVIDADE

## 5.3 TRATAMENTO DE DADOS

### 5.3.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO DA ESPESSURA

### 5.3.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO DA ADESIVIDADE

### 5.3.3 CORRELAÇÕES DOS PARÂMETROS

## 5.4 PLANEAMENTO DAS EXPERIÊNCIAS

### 5.4.1 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS

### 5.4.2 CONSTRUÇÃO DA MATRIZ ORTOGONAL

### 5.4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL



## 5 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

### 5.1 Introdução

O capítulo subsequente pretende descrever o procedimento de investigação do caso de estudo apresentado, desde a recolha de informação até à preparação das experiências. Esta metodologia aborda inicialmente a monitorização do processo, seguida da execução de testes e análise de dados, culminando na seleção e planeamento das experiências.

Com esse intuito, foi eleito o Método de Taguchi para a abordagem e solução do problema, dando uso ao longo do percurso de ferramentas para o tratamento de dados como *Excel*, *Visual Basic*, *SPSS* e *Minitab*.

### 5.2 Recolha de informação

#### 5.2.1 Processo produtivo

Numa primeira fase, iniciou-se o acompanhamento e monitorização do processo de calandragem. Esta possibilitou a adaptação ao processo, adquirindo conhecimento e informação dos métodos de trabalho, das etapas de cada matéria-prima na produção e das possíveis fontes de variação das características.

Deste modo, efetuou-se um registo de observações e valores de funcionamento dos demais componentes da calandragem, até então inexistente, acompanhado com informação sobre problemas/falhas ocorridas sobre essas condições. Apesar de especificados os parâmetros do processo, em determinados intervalos, de equipa para equipa e de operário para operário, diferentes configurações são adotadas para melhor responder as variações do sistema.

A Continental Mabor possui duas calandradas, denominadas como Calandra 1 (CAL1) e Calandra 2 (CAL2). Numa primeira abordagem foram documentadas as informações relativas à Calandra 1, incluindo posteriormente a segunda calandra no processo de registo.

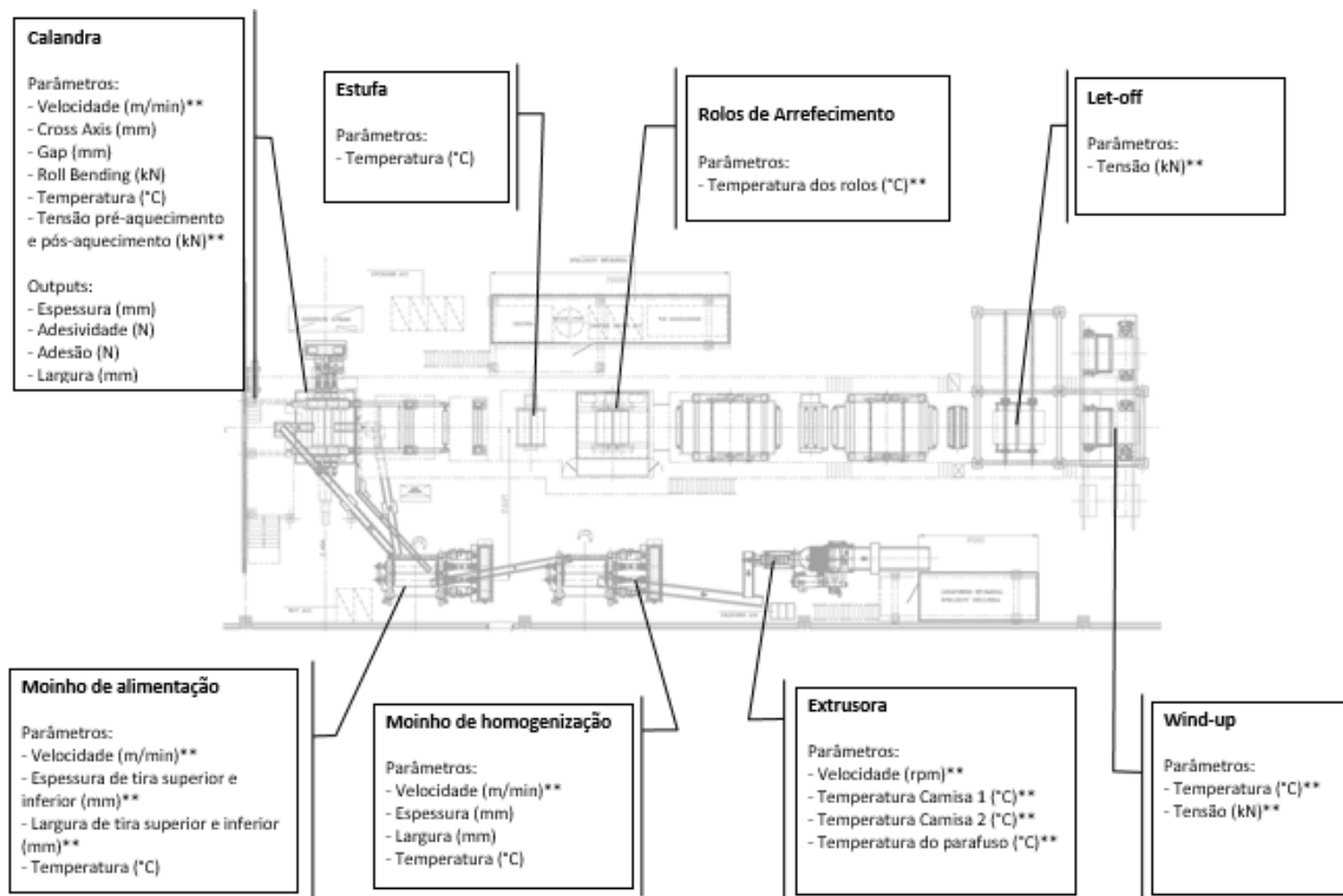


Figura 13 – Parâmetros de funcionamento dos componentes da calandragem.

Com uma estrutura mais antiga, a Calandra 1 é responsável por 60% da produção de tela têxtil e a totalidade da produção de tela metálica, funcionando aproximadamente 24 horas por dia. Por outro lado, a Calandra 2 conta com um sistema atualizado, fabricando os restantes 40% da produção do material têxtil, num período de 8 horas diárias. Apesar de algumas distinções, as duas calandras apresentaram oscilações no processo, de origem desconhecida.

Como supramencionado, inerente ao processo de calandragem existem diversos parâmetros que são controlados pelos operadores. Assim, efetuou-se o levantamento dos parâmetros de funcionamento (ver Figura 13) dos vários constituintes do processo que poderiam ser configurados pelos operários.

Devido ao grande número de parâmetros a registar e ao tempo de processamento de cada rolo calandrado, verificou-se a necessidade de delimitar os fatores para documentação. Desta forma, permaneceram aqueles que ainda não tinham sido objeto de estudo, excluindo desde logo os fatores interligados com a estufa, e aqueles considerados com potencial influência nas características da tela.

Reduzida a lista aos 14 fatores, assinalados na Figura 13 com dois asteriscos (\*\*), registaram-se adicionalmente dados relativos à hora e data de produção, equipa de operadores, tipo de material, comprimento de rolos e hora de corte do material.

A cada registo recolheu-se transversalmente três amostras circulares da Calandra 1 e cinco amostra da Calandra 2 (ver Figura 14). Esta desigualdade deveu-se ao facto do segundo caso aparentar maior sensibilidade no processo, aumentando assim o detalhe da informação para uma melhor perceção da variação existente.

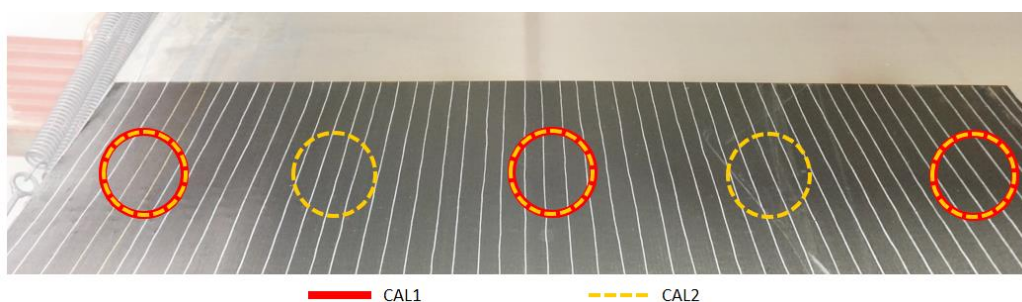


Figura 14 - Localização da recolha das amostras para a medição da espessura.

Simultaneamente, o sistema de feedback da calandragem permitiu gravar as medições de controlo da espessura da tela, reunindo um registo “online” e “offline” desta característica. A recolha de ambos os dados teve como finalidade verificar o correto funcionamento do sistema de medição *online*, podendo este influenciar negativamente o processo.

A atividade de recolha teve uma duração de três meses, documentando um total de 179 amostras da CAL1 e 203 amostras da CAL2. Registaram-se os tecidos calandrados com poliéster (P1319, P1365, P1370 e P1377) e com *rayon* (R1564 e R3002). Os dados recolhidos não são apresentados neste documento devido à confidencialidade dos mesmos.

### 5.2.2 Método de medição da adesividade

Em paralelo ao processo de registo, realizaram-se ensaios de adesividade de forma a introduzir o método de medição da característica, assim como familiarizar com o procedimento de recolha, transporte e preparação do teste laboratorial.

Embora identificado como o sistema com menor desvio em torno da média das medições, o sistema de medição de adesividade utilizado na Continental Mabor apresentava ainda uma quantidade substancial de variação. Deste modo, foi iniciado o estudo à metodologia de medição com o objetivo de diminuir a variação e ampliar a credibilidade dos resultados.

Conforme referido no capítulo anterior, para os ensaios laboratoriais da adesividade são preparadas 5 amostras em formato quadrangular da zona central e extremidades do tecido (ver Figura 15). Cada amostra é testada individualmente através do equipamento desenvolvido para o efeito, calculando posteriormente a média aritmética das medições para cada localização, expressa em *Newtons* (N).

Consultados os colaboradores ligados à medição desta propriedade, identificaram-se fatores da metodologia potenciadores de ruído nos ensaios. Assim, verificada a necessidade de reduzir o desvio foi realizado um *brainstorming* incluindo responsáveis de vários departamentos, entre eles os responsáveis da qualidade, laboratório, calandragem e metrologia.

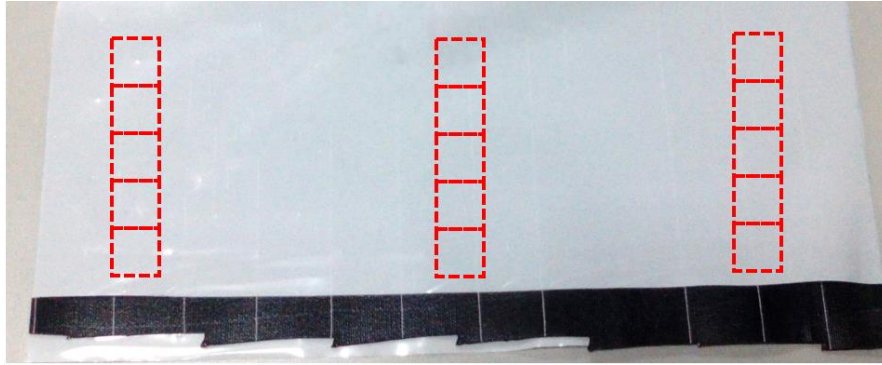


Figura 15 – Localização da recolha das amostras para controlo da adesividade.

Com vista à concretização do planeamento de experiências para a metodologia de avaliação da adesividade, não abrangido neste documento, e desmistificar pressupostos delinearam-se os seguintes testes preliminares:

- Limpeza do dinamómetro (1 em 1 amostra, 5 em 5 amostras);
- *Bleeder* (Com *bleeder*, Sem *bleeder*, *Bleeder* retirado);
- Centragem (Centrado, Descentrado);
- Zona de medição (Picotado, Não picotado);
- Ensaio sobre a mesma amostra (1ª medição, 2ª medição, 3ª medição);
- Plástico inferior (Com plástico, Sem plástico);
- Suporte fixo + Plástico inferior (Fixo + Com plástico; Fixo + Sem plástico).

Devido às características do processo de calandragem e as matérias-primas utilizadas, a preparação das amostras foram reduzidas apenas a uma das localizações de recolha, para que oscilações ao longo da largura não introduzissem erro nas medições.

Para efeito de estudo ensaiaram-se as telas calandradas com poliéster (P1319) e *rayon* (R1564 e R3002), procurando obter um número de amostras próximo de 30. O uso de diferentes materiais não teve qualquer implicação, uma vez que cada teste preliminar foi realizado com o mesmo material nas diferentes configurações, tendo como foco principal a variação do desvio-padrão.

## 5.3 Tratamento de dados

### 5.3.1 Sistema de medição da espessura

Após a conclusão da recolha de informação iniciou-se o tratamento dos dados, averiguando numa fase inicial a diferença entre os valores médios dos sistemas de medição de espessura.

Motivada pela insatisfação dos operadores da calandra sobre o funcionamento do processo, agravado em determinados materiais, esta análise teve como finalidade atualizar/corrigir as configurações do sistema de *feedback* da espessura da calandragem. Desse modo, definiu-se a medição com o perfilómetro (*offline*) como base de comparação para os valores obtidos na medição *online*.

Para a medição *offline* foram executadas 4 medições da espessura para cada uma das amostras retiradas por observação (ver Figura 16), resumindo por meio da média aritmética a apenas um valor, expresso em milímetros (mm). A recolha de múltiplos pontos deveu-se à não uniformidade da espessura do material calandrado.

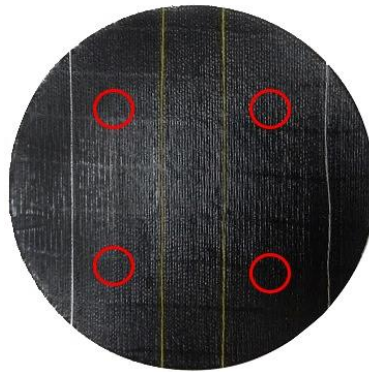


Figura 16 – Pontos de medição de uma amostra através do método *offline* (perfilómetro).

A medição *online* baseia-se num sistema de medição transversal (ver Figura 17) que perfaz um percurso em “zig-zag” para a leitura da espessura. No seu funcionamento normal não são registados os valores das medições, tendo essa função de ser ativa e desativada manualmente.

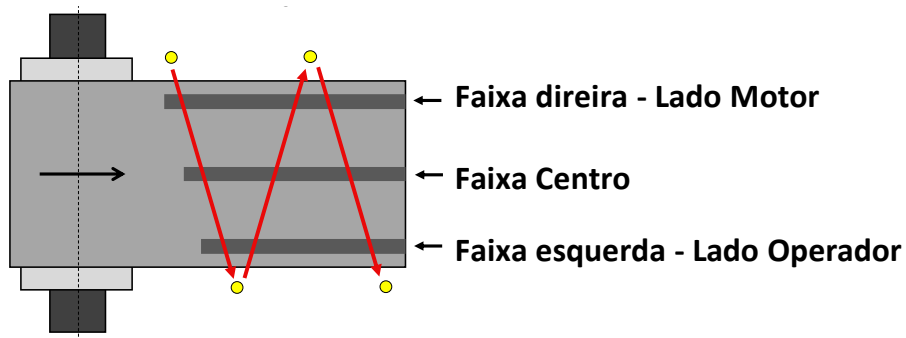


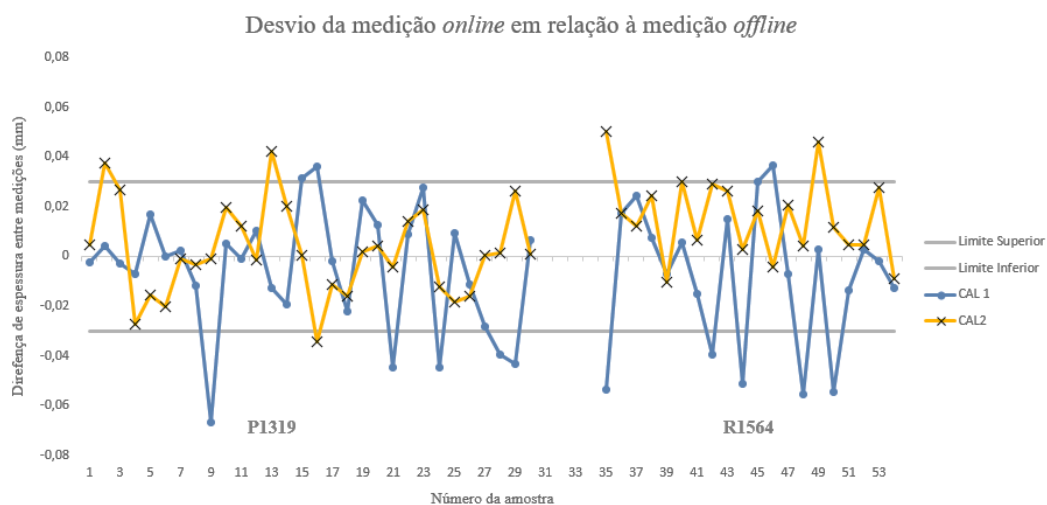
Figura 17 – Diagrama de funcionamento do sistema de medição online (adaptado Petar [5]).

Dado que o registo *online* de espessura incluía informação relativa a regiões onde não eram recolhidas amostras, identificou-se a necessidade de delimitar os dados a um intervalo de tempo e zona de medição, por forma a aproximar os dados recolhidos. Com esse propósito, desenvolveu-se um programa na ferramenta VBA do *Excel*, restringindo a informação a 2 minutos e a uma largura de 30 mm.

Similar ao tratamento de dados anterior, deu-se uso à média aritmética para a redução dos resultados a um único valor por amostra. Assim, a comparação entre o valor *online* em relação ao valor *offline* possibilitou a determinação do *offset* para a correção do sistema de *feedback*. O *offset* altera a informação transmitida pelo medidor à calandra, somando ou subtraindo o valor introduzido ao valor medido.

A título de exemplo, é apresentado no Gráfico 8 um excerto do desvio da medição de espessura *online* face ao valor da medição *offline*. Os limites presentes são apenas indicativos, representando 30% da tolerância especificada para a espessura.

Gráfico 8 – Desvio da medição *online* em relação à medição *offline* (espessura)



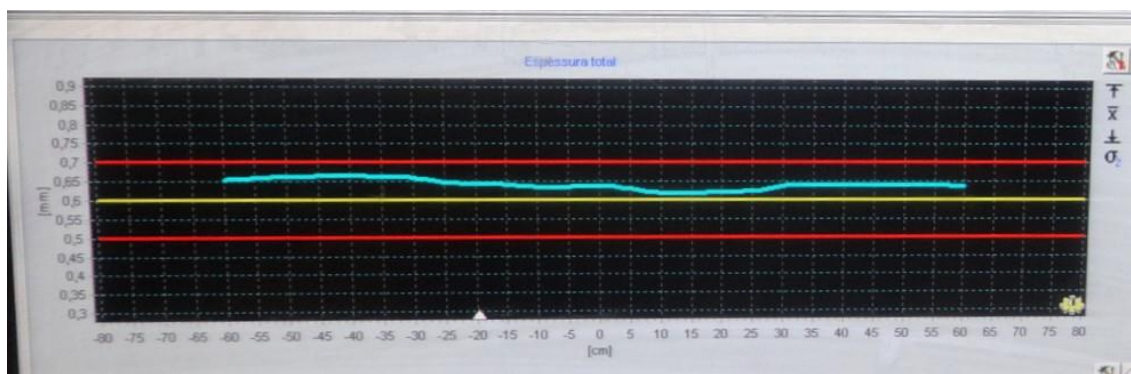


Figura 18 - Gráfico do controlo de espessura antes da atualização de *offsets*.

Após analisar o gráfico, é possível concluir que o comportamento não homogéneo dos diferentes materiais ao longo dos registos, em ambas as calandras, sugerindo que a causa do desvio não se restringe ao normal desgaste dos componentes do processo.

A solução a curto prazo tomada pelos colaboradores baseava-se na desativação do controlo da espessura segundo as medições realizadas pelo sistema, regulando manualmente os parâmetros dos rolos da calandra. Uma vez configurada a calandra para a espessura especificada, por meio de medições no perfilómetro, era verificado um desvio da média da espessura do valor-alvo no painel de controlo (ver Figura 18).

Observando a diferença média entre a medição *online* e *offline* de espessura deliberam-se os valores de *offset* apresentados na Tabela 8 para os diferentes materiais têxteis.

Tabela 8 – Tabela de registo da atualização de *offset* para material têxtil.

Denominação	Offset	
	Calandra 1	Calandra 2
P1319	-0,05	-0,04
P1365	-0,04	-0,04
P1370	-0,06	-0,06
P1377	-0,05	-0,04
R1564	-0,04	-0,06
R3002	-0,04	-0,02

Após a atualização das configurações do sistema deu-se continuidade à monitorização do processo por forma a validar as alterações imputadas. Em conformidade com os resultados obtidos e os relatos dos operadores da calandragem tomou-se como

validados os *offsets* do material têxtil. A título de exemplo, é apresentado na Figura 19 o gráfico das medições para controlo de espessura para o material P1319.

Apesar de não reduzir significativamente a variação da espessura, esta medida permitiu a estabilização do processo em modo automático, expondo a necessidade de um controlo periódico do sistema de medição *online*. Desta forma, conseguiu-se um aumento da qualidade do tecido calandrado e uma redução do material não conforme.

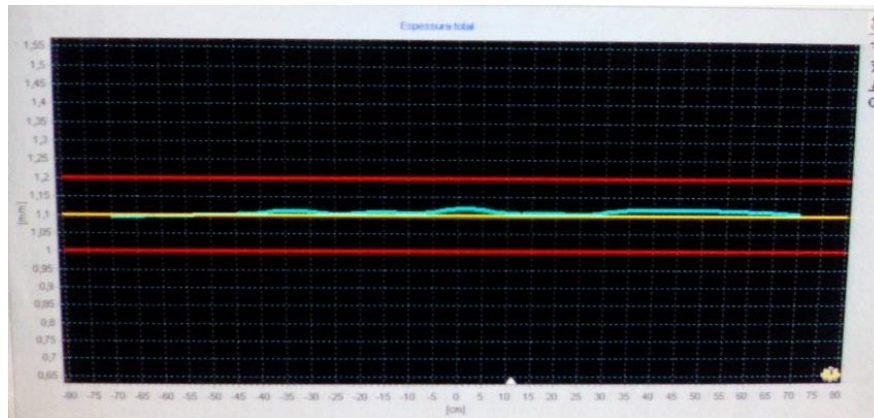


Figura 19 – Gráfico do controlo de espessura após a atualização de *offsets*.

### 5.3.2 Método de medição da adesividade

Visando a redução da variação da metodologia de medição da adesividade conduziram-se um conjunto de ensaios preliminares, descritos anteriormente, sendo obtidos os resultados (ver Anexo D) sumarizados no Gráfico 9. O gráfico segue o modelo fornecido pela Continental Mabor, apresentando a média dos resultados com três desvios-padrão ( $\sigma$ ), indicando o valor do desvio sobre cada teste.

Para efeitos de estudo não serão considerados os valores médios da adesividade, posto que esta propriedade tem como referência os resultados obtidos segundo o método em uso. Caso identificada uma técnica/sistema com maior valor médio, mas com menor variação, o referencial poderá ser alterado para a nova metodologia sem prejuízo para as características da tela calandrada. A única limitação seria a capacidade da máquina, atualmente de 50 N, necessitando a aquisição de outro equipamento com maior intervalo de medição.

Analisando o gráfico é possível identificar que os fatores limpeza do dinamómetro, *bleeder* e zona de medição, não apresentam diferenças significativas entre os níveis ensaiados, contendo variações entre os 2,2 e 2,7 N.

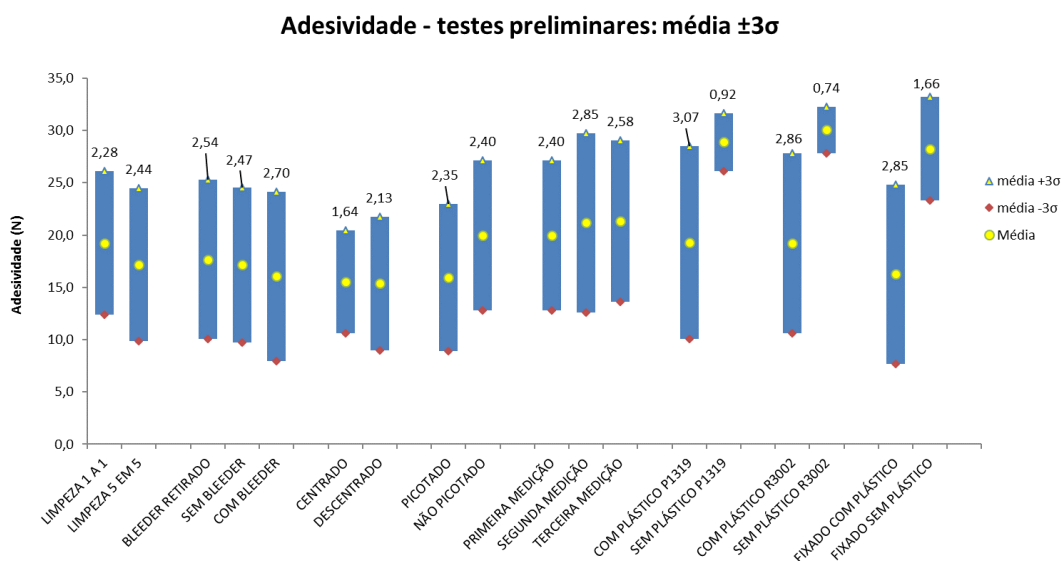
O pressuposto de diferentes resultados para medições sobre a mesma amostra é por sua vez desmistificado, verificando-se uma média aproximada de 20 N entre medições assim como um desvio da média semelhante.

No caso da centragem das amostras observa-se uma diminuição de 0,5 N no desvio-padrão dos resultados, reduzindo de 2,1 para 1,6 N, considerado este parâmetro como significativo para as medições.

Não obstante, é no fator do “plástico inferior” que se verificam as diferenças com maior amplitude, contemplando-se uma redução de  $\frac{1}{3}$  da variação no material P1319, resultando numa variação de 0,92 N quando testadas as amostras sem plástico inferior. Face aos resultados concretizou-se ensaios ao material R3002, conseguindo um desvio-padrão de 0,74 N. Desta maneira, comprovou-se que a ausência do plástico inferior no ensaio tem impacto significativo no método de medição.

Por último, averiguou-se a combinação da fixação do suporte do medidor e a presença de plástico inferior, possibilitando a análise direta entre esta combinação e a comparação com o fator plástico inferior individualmente uma vez que a este segue o mesmo princípio, porém com base móvel.

Gráfico 9 - Testes preliminares da metodologia de medição da adesividade.



Fixando a base é observada uma diminuição do desvio-padrão quando retirado o plástico inferior, ainda que em menor amplitude. Contudo quando comparado com o fator anterior, a base móvel obtém um valor de 0,74 N contra os 1,66 N da base fixa. Assim sendo, a utilização da base móvel é benéfica para o método de medição.

Conforme os resultados dos testes preliminares elegeu-se os seguintes parâmetros para os ensaios da adesividade das experiências: limpeza de 1 em 1 amostra; sem *bleeder*; amostra centrada; sem plástico inferior; base móvel.

### 5.3.3 Correlações dos parâmetros

A influência dos parâmetros pode ocorrer de duas formas: diretamente quando a modificação do valor de um parâmetro provoca a alteração da resposta do sistema ou indiretamente através de interações entre parâmetros.

Com o objetivo de analisar a existência de correlação na calandragem utilizou-se o registo de informação para a comparação entre fatores, uma vez que este compila os diferentes parâmetros de funcionamento e *output* da espessura sobre essas condições.

Deste modo, definiu-se o método proposto por *Spearman* para o estudo de correlações. Esta técnica requer a ordenação prévia dos valores de ambos termos em estudo, atribuindo posteriormente um *rank* crescente a cada um desses valores. Por fim, é calculado o coeficiente de correlação através dos *ranks* imputados.

Para o tratamento dos dados recorreu-se à ferramenta de análise estatística *IBM SPSS Statistics 22*, obtendo-se em formato tabular (ver Tabela 9) os coeficientes de correlação entre os fatores e nível de significância.

Os parâmetros encontram-se alocados por linhas e colunas, em que cada linha é constituída pelo conjunto de dados anteriormente referidos. Para identificar o coeficiente de correlação entre dois fatores deve ser selecionada a linha do primeiro fator e a coluna do segundo fator, resultando da intersecção destes o valor do coeficiente.

Tabela 9 – Excerto da tabela de correlações para material P1319 (Calandra 1).

		Equipa	Velocidade (calandragem)	Vel. Moinho Aliment.	Vel. Moinho Homogen.	Largura de Tira Sup.	Largura de Tira Inf.	Tensão Pré-Aquec.	Tensão Pós-Aquec.	
P1319	Esp. Online Lado Esq.	Correlation Coefficient	,033	,064	,308	,440	,693**	,142	,687	,060
		Sig. (2-tailed)	,912	,829	,284	,115	,006	,628	,060	,888
	Esp. Offline Lado Esq.	Correlation Coefficient	,050	,002	,314	,409	,687**	,345	,523	-,106
		Sig. (2-tailed)	,866	,994	,274	,146	,007	,227	,148	,786
	Esp. Online Centro	Correlation Coefficient	,169	,318	,413	,457	,565	,467	-,253	-,659
		Sig. (2-tailed)	,620	,340	,206	,157	,070	,148	,545	,076
	Esp. Offline Centro	Correlation Coefficient	,348	-,041	,615*	,701**	,413	,570*	,309	-,072
		Sig. (2-tailed)	,223	,890	,019	,005	,142	,033	,418	,854
	Esp. Online Lado Dir.	Correlation Coefficient	-,109	,409	,056	-,161	-,012	-,483	-,505	-,126
		Sig. (2-tailed)	,764	,241	,878	,658	,973	,157	,248	,788
	Esp. Offline Lado Dir.	Correlation Coefficient	,367	-,112	,614*	,627*	,294	,276	,146	-,128
		Sig. (2-tailed)	,197	,703	,019	,017	,308	,340	,708	,742

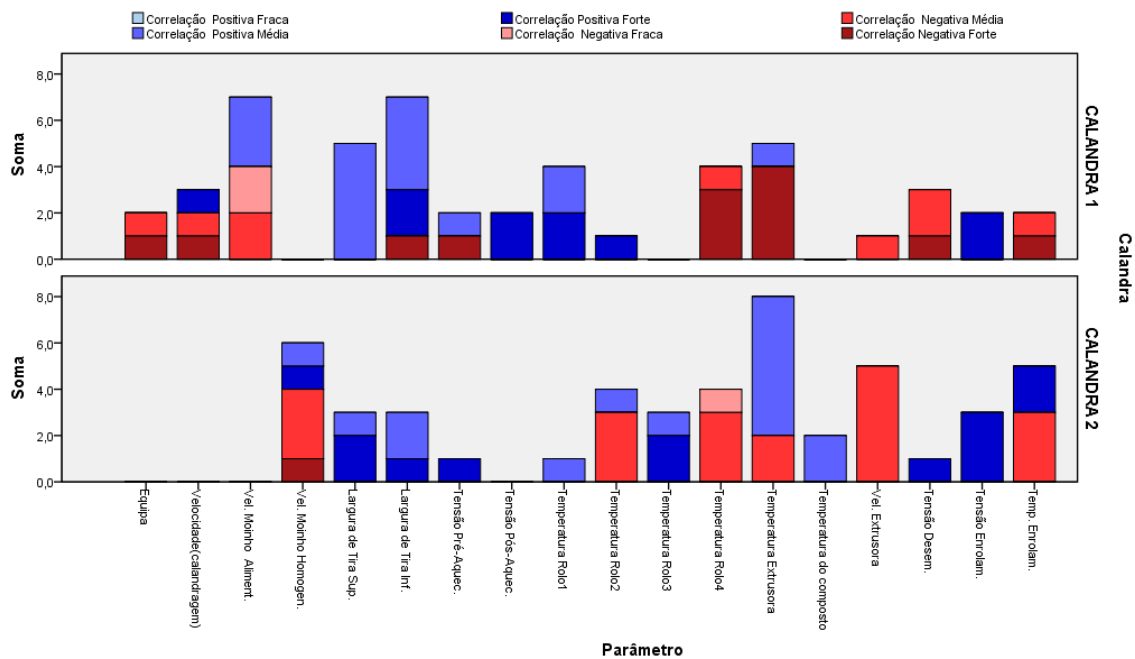
Determinadas relações dispostas nas tabelas de correlações dos diferentes materiais (ver Anexo E) não apresentavam relevância para o caso de estudo análise. Assim, restringiram-se o número de comparações, permanecendo apenas as correlações entre parâmetros e espessuras.

Procurando sintetizar a informação relevante classificaram-se os valores dos coeficientes por grupos, considerando somente as correlações com significância inferior ou igual a 6,5% definido pela empresa. Com o propósito de sumarizar essa informação, associado as observações registadas foi construído o Gráfico 10 expondo os fatores, tipo de correlações e número de vezes que estas foram identificadas.

Com base no conhecimento do processo era expectável que alguns parâmetros apresentassem correlação com a espessura, como, por exemplo, a largura de tira, dado que quanto maior a espessura do tecido calandrado maior terá que ser o abastecimento de borracha.

Contudo, utilizando o exemplo anterior é possível verificar a presença de correlações positivas e ainda uma correlação negativa no parâmetro largura de tira inferior, contrariando as expectativas. Outros parâmetros, como a temperatura da extrusora ou dos rolos, apresentam as mesmas contrariedades, motivando o uso destes na seleção de fatores do Método de Taguchi.

Gráfico 10 – Gráfico de barras empilhado das correlações entre parâmetros e espessuras.



## 5.4 Planeamento das experiências

O planeamento das experiências teve por base o método descrito por Taguchi, aplicando as noções por ele delineadas. Na Continental Mabor, esta metodologia tem sido, com êxito, empregada em diversos casos, sendo este um dos motivos para a sua utilização da metodologia. Vantagens como a redução de experiências e a deteção de interações foram também consideradas.

Para a atividade de planeamento de experiências e análise de dados utilizaram-se as ferramentas *Excel* e *Minitab 17*. Toda a informação foi introduzida em ambos os programas para processamento e confirmação dos resultados.

As deliberações e considerações impostas nesta etapa contaram com o suporte da equipa de trabalho destacada para o caso, incluindo esta o responsável do processo, responsáveis da misturação, qualidade, laboratório e os respetivos colaboradores.

### 5.4.1 Seleção dos parâmetros

Uma vez determinado o problema e as propriedades para medição da resposta, seguiu-se a determinação do objetivo do estudo. Dado a natureza do caso, definiu-se a diminuição da variação de espessura por forma a orientar o estudo, não prejudicando

em grande escala as restantes propriedades. As considerações tomadas no documento serão fundamentadas de acordo com este objetivo.

Deste modo, para a seleção dos parâmetros adaptou-se a informação de um *brainstorming* elaborado para o processo de calandragem, confinado aos tópicos relativos à variação do tecido calandrado, resultando no Diagrama de Causa e Efeito ilustrado na Figura 20.

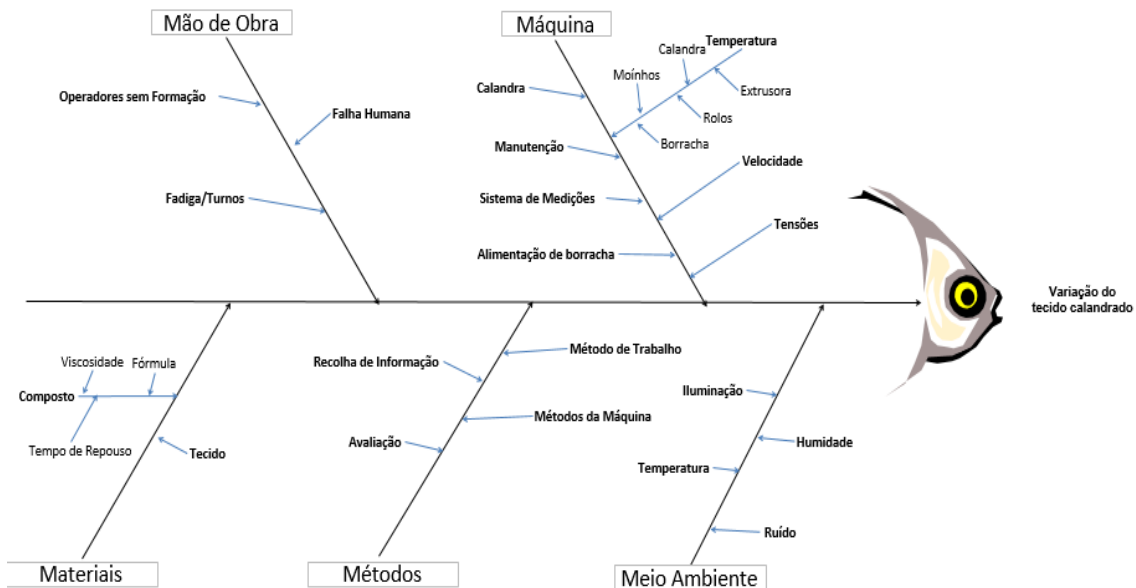


Figura 20 – Diagrama de Causa e Efeito para a variação do tecido calandrado (adaptado Continental).

Reunindo a informação conseguida através dos registos, análise das correlações, conhecimento dos intervenientes no estudo e diagrama apresentado, determinaram-se os seguintes parâmetros para o desenho das experiências:

- **Largura de tira**

Na alimentação de borracha na calandra são controlados três fatores nas tiras de alimentação que condicionam o fluxo de entrada do composto: a largura, a espessura e a velocidade. Esse fluxo de alimentação gera um “banco de borracha” (definição Continental) que é consumido durante o processo, onde fenómenos de sobreaquecimento/vulcanização ocorrem. Uma vez que o controlo do banco seria abstrato e pouco preciso, definiu-se a largura de tira como parâmetro para estudo.

- **Viscosidade do composto**

Como matéria-prima de todo o processo produtivo, o composto de borracha é um dos principais focos de controlo, visto que variações deste podem resultar em problemas na produção, provocando custos acrescidos no sistema produtivo. Determinadas propriedades do composto são ensaiadas para controlo, sendo a viscosidade um dos fatores de alerta e eliminatório caso verificado algum tipo de anomalia no composto. Assim, foi incluída a viscosidade nos fatores das experiências.

- **Temperatura da extrusora**

A extrusora é o primeiro componente em que o composto é preparado para a calandragem, aumentando a temperatura, plastificando e homogeneizando. O mau funcionamento/*setup* deste pode originar a formação de “grumos” na borracha e conseqüentemente problemas no processo e produto. A temperatura da borracha da extrusão é dependente das temperaturas de três componentes e da velocidade de rotação do parafuso. Conseqüentemente, identificou-se a temperatura da extrusora (*setup* dos três componentes) como fator com potencial influência na variação do processo.

- **Tensão do têxtil**

O material têxtil que abastece a calandra perfaz um percurso por buffers, sistemas de centragem, sistemas de controlo de dispersão e rolos tensores para adquirir as características desejadas. Com base na crença da influência deste fator e pelo facto de valores anómalos da tensão condicionarem o diâmetro do filamento, gerando variações da espessura e problemas relacionados com a adesão em verde, selecionou-se a tensão do têxtil (configuração da tensão pré e pós-calandragem) como parâmetro das experiências.

- **Temperatura dos rolos**

A calandra em estudo é constituída por 4 rolos (rolo 1, 2, 3 e 4) com disposição em Z inclinada. O composto é abastecido na calandra entre os rolos 1-2 e 3-4,

criando em cada conjunto uma camada independente, posteriormente unidas pelo conjunto dos rolos 2-3. Os rolos são mantidos a temperaturas próximas das temperaturas das tiras de alimentação, interagindo assim com a fluidez do composto e com as temperaturas do banco, provocando variação da espessura do material. Por esse motivo, definiu-se a temperatura dos rolos como parâmetro para estudo.

Uma vez que o Método de Taguchi permite a análise de interações entre os parâmetros, adicionaram-se as interações “viscosidade do composto × temperatura da extrusora” e “viscosidade do composto × temperatura dos rolos”, acreditando-se que estas afetavam a variação da espessura.

Devido à inexistência de estudos precedentes na Continental Mabor sobre os parâmetros influentes na calandragem delimitou-se o planeamento de experiências a fatores com dois níveis. Com esse propósito, definiram-se os níveis dos parâmetros apresentados por códigos, como demonstrado na Tabela 10. Aos fatores atribuíram-se letras para simplificar apresentações futuras.

Os níveis atribuídos procuram abordar os valores extremos experienciados no funcionamento da calandragem, exceto o caso da viscosidade do composto. A viscosidade “Baixa” foi induzida no composto, sendo os valores de viscosidade inferiores aos utilizados na produção.

Tabela 10 – Descrição dos fatores, interações e níveis para o planeamento de experiências.

<b>Fator</b>	<b>Descrição</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>
A	Largura de tira	S6-I8	S9-I13
B	Viscosidade do composto	Baixa	Produção
C	Temperatura da extrusora	P80-C1E35-C2E75	P90-C1E45-C2E85
D	Tensão do Têxtil	A7-D7	A5,5-D9,5
E	Temperatura dos rolos	70	90
	Interação B×C	1	2
	Interação B×E	1	2

### 5.4.2 Construção da matriz ortogonal

Face aos parâmetros e interações selecionados e seus níveis elegeu-se a matriz ortogonal L8 de Taguchi para construção das experiências. Dado que foram escolhidos cinco fatores e duas interações, todas as colunas da matriz encontram-se ocupadas, tornando-se numa matriz saturada.

Para a alocação dos fatores/interações na matriz ortogonal deu-se uso à tabela triangular designada para a matriz L8 (ver Tabela 5). Distribuídos os fatores por ordem alfabética obteve-se a sequência: coluna 1 – A, ..., coluna 5 – E, restando as colunas 6 e 7 para ocupar. Conforme a tabela triangular mencionada, a interação B×E deve ser alocada na coluna 7, até então desocupada. No entanto a interação B×C requer a alocação na coluna 1, ocupada pelo fator A. Como não será analisada nenhuma interação com o fator A, é alocada a interação B×C na coluna 1 e o parâmetro A na coluna 6.

Concluída a etapa de alocação, finda igualmente a construção da matriz ortogonal, obtendo a configuração das experiências como representado na Tabela 11.

Tabela 11 – Alocação dos fatores e interações na matriz ortogonal L8 de Taguchi.

Experiência	B×C	B	C	D	E	A	B×E
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

### 5.4.3 Procedimento experimental

Conforme a metodologia de Taguchi, e caso o objeto de estudo o permita, deve ser computada uma ordem aleatória para a concretização das experiências, de modo a reduzir a influência dos fatores não controláveis ou desconhecidos sobre os resultados.

Assim, utilizou-se a ferramenta *Excel* para gerar aleatoriamente a ordem, obtendo a sequência de experiências 3-5-2-4-8-7-1-6.

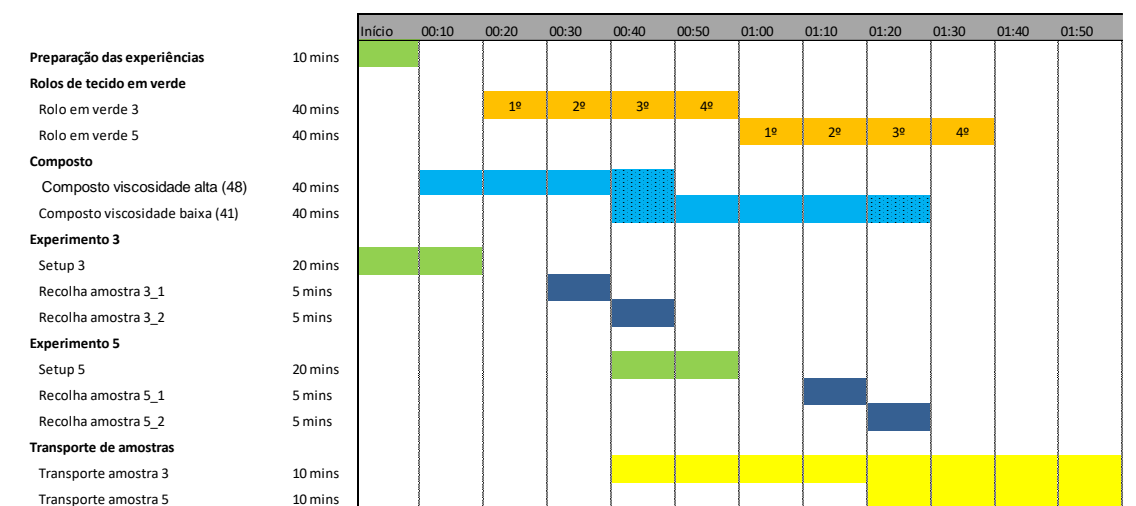
Visando a melhor execução das experiências optou-se pela realização dos ensaios na Calandra 1, uma vez que o sistema desta simplificava a configuração dos parâmetros sem interferir com outras definições da máquina. Com o mesmo objetivo definiu-se o material têxtil poliéster P1319, devido às características superiores que este apresenta em relação a outros, introduzindo menor ruído nos resultados.

Estabeleceu-se ainda que o controlo automático de espessura, responsável pelo ajuste das configurações posicionais dos rolos, seria desativado no decorrer dos ensaios. Esta ação pretendia restringir qualquer influência do sistema de controlo sobre os dos resultados alcançados.

Dado o funcionamento contínuo da calandra em estudo, foi tomada a decisão de distribuir a realização das experiências em 3 dias. Pretendendo aproximar as características ambientais e do funcionamento do processo executaram-se as experiências dos diferentes dias em horários semelhantes, diminuindo o ruído das experiências.

Por fim, determinou-se que a concretização das experiências seria em contexto de produção, isto é, sem a existência de paragens entre experiências. Desta forma, reproduziram-se as características reais para o conjunto de parâmetros definido pela experiência, mantendo todos os outros parâmetros controláveis fixos.

Gráfico 11 – Excerto do Diagrama de Gantt do plano de execução experiências.



Tomadas todas as considerações, iniciou-se a preparação das experiências. Com a finalidade de estruturar e organizar a reprodução das experiências elaborou-se um Diagrama de Gantt (ver Anexo F), ilustrado um excerto no Gráfico 11.

A cada experiência atribuiu-se um rolo em verde de material têxtil, correspondendo este a quatro rolos de tela calandrada. De forma a garantir a recolha de amostras sobre as condições desejadas realizou-se o *setup* da experiência após obtenção da segunda amostra, restando um intervalo superior a 20 minutos para os parâmetros de funcionamento estabilizarem.

Não existindo a possibilidade de replicar as experiências, consideraram-se as amostras recolhidas dos rolos calandrados 2 e 3 como repetições da experiência, mantendo as definições da experiência para ambos, reunindo assim maior quantidade de informação relativa às propriedades da tela têxtil. Os ensaios das propriedades solicitaram a recolha de amostras com dimensões de 1 metro de comprimento por 1,5 metros de largura.

De acordo com os objetivos delineados para o caso, foram nomeadas as características da qualidade para a transformação dos resultados:

- **Espessura – Nominal-é-melhor (NBD)**

Como citado anteriormente, o propósito do estudo é a diminuição da variação da espessura, selecionando-se a característica da qualidade Nominal-é-melhor (NBD). O valor-alvo da espessura será estabelecido por meio das configurações mecânicas dos rolos da calandra (*gap, roll bending, etc.*)

- **Green-Adhesion – Maior-é-melhor**

A característica Maior-é-melhor foi eleita para o *green-adhesion* tendo por base que o incremento do valor médio desta propriedade intensificará a interligação entre o material têxtil e borracha.

▪ **Adesividade – Menor-é-melhor**

Devido aos problemas de aderência a diferentes constituintes do processo produtivo, causados por um elevado valor da adesividade, designou-se a característica da qualidade Menor-é-melhor a fim de reduzir o valor deste atributo.

Uma vez que as interações das experiências são controladas pelos parâmetros envolvidos, transformou-se a matriz ortogonal na seguinte tabela (ver Tabela 12).

Tabela 12 - Organização e configuração da matriz ortogonal L8 para a realização das experiências.

Ordem	Experiência	Largura da tira	Viscosidade do composto	Temperatura da extrusora	Tensão do têxtil	Temperatura dos rolos
1	3	S9-I13	Produção	P90-C1E45-C2E85	A7-D7	70
2	5	S6-I8	Baixa	P90-C1E45-C2E85	A7-D7	90
3	2	S9-I13	Baixa	P80-C1E35-C2E75	A5,5-D9,5	90
4	4	S6-I8	Produção	P90-C1E45-C2E85	A5,5-D9,5	90
5	8	S6-I8	Produção	P80-C1E35-C2E75	A5,5-D9,5	70
6	7	S9-I13	Produção	P80-C1E35-C2E75	A7-D7	90
7	1	S6-I8	Baixa	P80-C1E35-C2E75	A7-D7	70
8	6	S9-I13	Baixa	P90-C1E45-C2E85	A5,5-D9,5	70

# APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

6.2 RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS

6.2.1 ESPESSURA

6.2.2 GREEN-ADHESION

6.2.3 ADESIVIDADE

6.3 QUADRO RESUMO

6.4 VALIDAÇÃO



## 6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 Introdução

No capítulo que se segue serão expostos e analisados os resultados da preparação e realização das experiências para a determinação dos parâmetros influentes na calandragem têxtil.

Inicialmente apresentam-se os discutem-se os resultados das experiências segundo o Método de Taguchi, dispondo os gráficos de efeito principal de cada parâmetro conseguidos através da ferramenta *Minitab* e as tabelas relativas à análise de variância, assim como a validação desses mesmos resultados.

### 6.2 Resultados das experiências

Finda a preparação e planeamento segundo o método proposto por Taguchi, deu-se início à realização das experiências delineadas pela matriz ortogonal construída para o presente caso de estudo.

Uma vez que os ensaios experimentais seriam concretizados em contexto de produção, a entidade tomou a decisão de utilizar todo o material resultante do estudo, caso este apresenta-se as propriedades dentro dos limites especificados, com o intuito da redução do custo das experiências. Esta condição limitou a condução das experiências dado que a necessidade de produzir material conforme, especialmente na propriedade espessura.

Durante a preparação e realização da primeira experiência da ordem aleatória da Tabela 12, verificou-se que o banco de borracha controlado pelo fator “largura da tira” exibiu um comportamento instável, provocando a falta de composto no tecido calandrado. Deste modo, juntamente com o responsável do processo, desconsiderou-se este fator para o estudo, incluindo a largura de tira no erro experimental da análise de variância dos resultados e mantendo um banco intermédio nas experiências.

Devido à natureza do processo de calandragem e ao objetivo de obter a maior informação possível das experiências definiu-se um grau de confiança de 90% para a análise dos resultados, sendo utilizado para a determinação do  $F$  crítico.

### 6.2.1 Espessura

Com o propósito da identificação dos fatores influentes na variação em torno da média da espessura calcularam-se os valores para a razão S/N (ver Anexo G) segundo a característica da qualidade Nominal-é-melhor (NBD) através da equação (6), exemplificado abaixo para o DOE 1:

$$S/N_{\text{NBD}} = -10 \log_{10}(\sigma_i^2) = -10 \log_{10} \left( \frac{(1,08-1,10)^2 + \dots + (1,13-1,10)^2}{24-1} \right) = 37,29$$

Concluída a transformação dos dados obtiveram-se os efeitos principais dos fatores (ver Gráfico 12) e interações (ver Gráfico 13). Os efeitos principais da viscosidade do composto (*visc.composto*) dando uso à formulação (3), como se segue:

$$m_{\text{visc.compostoBaixa}} = \frac{37,29+35,01+30,79+33,62}{4} = 34,18$$

$$m_{\text{visc.compostoProdução}} = \frac{29,52+29,86+35,43+31,55}{4} = 31,59$$

Observando o declive das retas, isto é, a diferença entre o efeito médio dos níveis de cada parâmetro, verifica-se que os fatores viscosidade e temperatura influenciam a resposta do sistema em relação à propriedade espessura.

Por outro lado, a temperatura dos rolos apresenta uma pequena inclinação da reta, portanto a sua influência na espessura não é significativa. Para o caso da tensão do têxtil não se poderá aferir nenhuma conclusão através do declive da reta.

Gráfico 12 – Efeitos principais para a razão S/N da espessura.

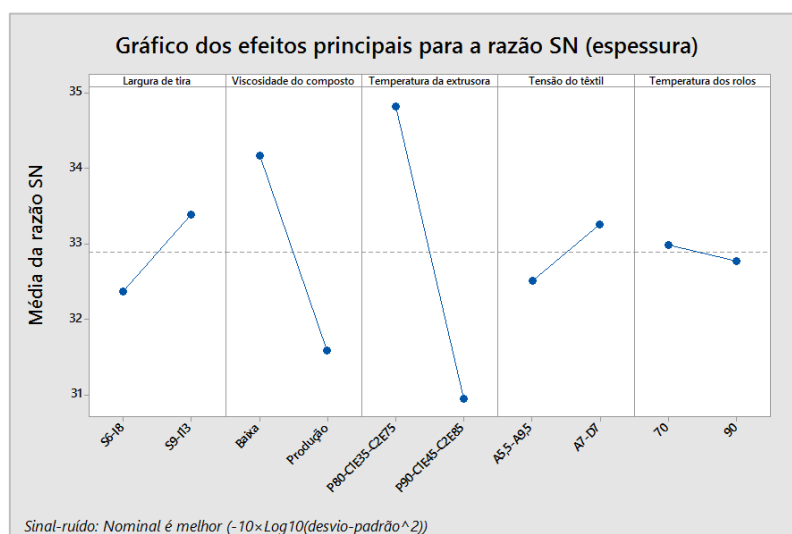
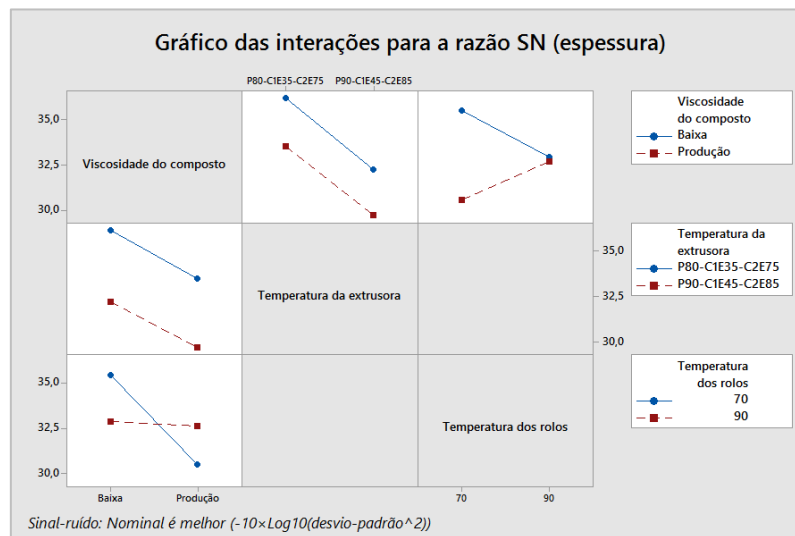


Gráfico 13 – Interações para a razão S/N da espessura.



Quanto ao gráfico das interações em estudo, é possível averiguar um paralelismo entre as retas da interação “viscosidade do composto × temperatura da extrusora”, significando que não existe relação entre os parâmetros. Todavia, o comportamento inverso é visível na interação “viscosidade do composto × temperatura dos rolos”, indicando a interação entre este.

Dando continuidade ao estudo dos resultados da espessura executou-se a análise de variância para a razão S/N da espessura (ver Tabela 13), representando a tabela final após todas as considerações necessárias.

Tabela 13 - Análise de variância dos resultados da espessura.

Fator	Descrição	Pooling	df	SS	V	F	SS'	Contribuição
	BxC	s	1					<i>Pooled*</i>
B	Viscosidade do composto	n	1	13,36	13,36	16,12	12,53	22%
C	Temperatura da extrusora	n	1	30,02	30,02	36,22	29,19	51%
D	Tensão do têxtil	s	1					<i>Pooled*</i>
E	Temperatura dos rolos	s	1					<i>Pooled*</i>
A	Largura de tira	s	1					<i>Pooled*</i>
	BXE	n	1	10,89	10,89	13,14	10,06	17%
	Erro* (Pooled)		4	3,32	0,83		5,80	10%
	Total		7	57,59				100%

O processamento matemático da ANOVA para o fator temperatura da extrusora (*Textrusora*) é demonstrado abaixo, onde os valores referentes a outras variáveis foram retirados da tabela supramencionada.

$$df_{Textrusora} = 2 - 1 = 1$$

$$SS_{Textrusora} = \left( \frac{(37,29 + \dots + 35,43)^2}{4} + \frac{(29,52 + \dots + 33,62)^2}{4} \right) - \frac{263,07^2}{8} = 30,02$$

$$V_{Textrusora} = \frac{30,02}{1} = 30,02$$

$$F_{Textrusora} = \frac{30,02}{0,83} = 36,22$$

$$SS'_{Textrusora} = 30,02 - (1 \times 0,83) = 29,19$$

$$P_{Textrusora} = \frac{29,09}{57,59} \times 100 = 51\%$$

Para simplificar a identificação dos parâmetros que sofreram *pooling* acrescentou-se uma coluna para esse efeito com os códigos “s” quando realizado o *pooling* e “n” caso não realizado, sendo adicionados ao erro os fatores não significativos em conformidade com a técnica *pooling up*. A significância dos parâmetros resultou da comparação individual do resultado *F* com o *F* crítico, que para este caso possui o valor de 4,54 ( $F_c = F_{0,90;1,4}$ ).

Como previsto anteriormente, os fatores viscosidade e temperatura da extrusora são significativos para o modelo, incidindo percentagem significativa de contribuição sobre o segundo parâmetro de 51% e de 22% para a viscosidade. A influência da interação “viscosidade do composto × temperatura dos rolos” é também comprovada pela ANOVA, contribuindo com 17%. A melhor resposta do sistema obtém-se nos níveis Baixa, P80-C1E35-C2E75 e Baixa×70 respetivamente.

A presença de 10% de erro experimental indica que não foram deixados de parte parâmetros importantes para a análise desta propriedade.

### 6.2.2 Green-Adhesion

Aplicando os mesmos princípios aos resultados do *green-adhesion*, formularam-se os resultados da razão S/N para a característica Maior-é-melhor conforme a equação (7), presentes no Anexo H.

Os resultados dos efeitos principais são expostos nos dois gráficos que se seguem (ver Gráfico 14 e Gráfico 15). Focando as atenções no Gráfico 14 é possível identificar parâmetros com inclinações das retas consideráveis, sendo a reta relativa ao fator tensão do têxtil a mais significativa. Dado que esta propriedade é proveniente da união entre o material têxtil e o composto, era expectável que este parâmetro possuísse impacto sobre os resultados.

Analisando as interações entre os fatores, uma vez mais é verificada a intersecção entre as retas da interação “viscosidade do composto × temperatura dos rolos”. Por sua vez, mesmo não apresentando o paralelismo anterior, não é possível afirmar a existência da interação “viscosidade do composto × temperatura da extrusora”.

Concluída esta etapa, concretizou-se a análise ANOVA sobre dados do *green-adhesion*. Em conformidade com o nível de confiança definido para o caso de estudo e os graus de liberdade dos parâmetros e erro obteve-se um  $F$  crítico de 5,54 ( $F_c = F_{0,90;1;3}$ ).

Gráfico 14 - Efeitos principais para a razão S/N do green-adhesion.

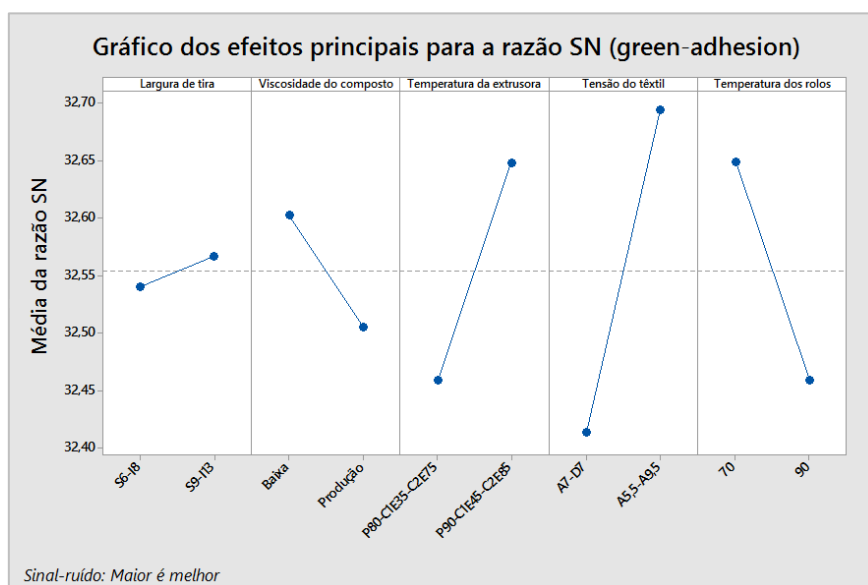
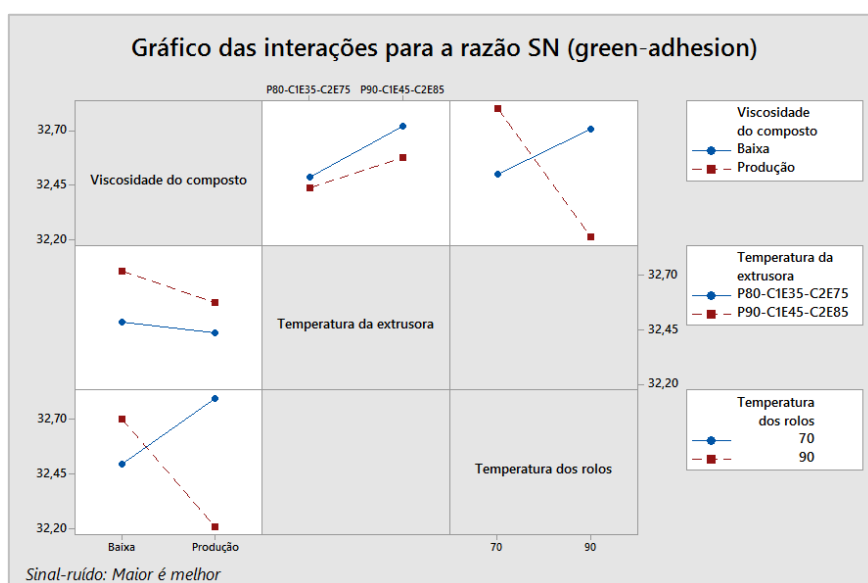


Gráfico 15 - Interações para a razão S/N do green-adhesion.



Contrariamente ao esperado, a ANOVA (ver Tabela 14) identificou a interação da viscosidade com a temperatura dos rolos como o parâmetro com maior impacto na resposta do *green-adhesion* com 48% de contribuição, seguido da tensão do têxtil com 23% e 10% para os fatores C e E.

Novamente é alcançado um valor baixo de erro experimental com cerca de 9%, expressando que as experiências foram conduzidas com a configuração dos parâmetros importantes para esta característica da tela têxtil.

Tabela 14 - Análise de variância dos resultados do green-adhesion.

Fator	Descrição	Pooling	df	SS	V	F	SS'	Contribuição
	Interação BxC	s	1			<i>Pooled*</i>		
B	Viscosidade do composto	s	1			<i>Pooled*</i>		
C	Temperatura da extrusora	n	1	0,07	0,07	8,67	0,06	10%
D	Tensão do têxtil	n	1	0,16	0,16	19,17	0,15	23%
E	Temperatura dos rolos	n	1	0,07	0,07	8,82	0,06	10%
A	Largura de tira	s	1			<i>Pooled*</i>		
	Interação BXE	n	1	0,32	0,32	38,98	0,31	48%
	Erro* (Pooled)		3	0,02	0,01		0,06	9%
	Total		7	0,64				100%

### 6.2.3 Adesividade

Por fim, examinaram-se os resultados obtidos (ver Anexo I) na medição da adesividade das amostras referentes a ensaios experimentais. Para esta propriedade aplicou-se a razão S/N segundo a equação (4) da característica da qualidade Menor-é-melhor.

Analisando os Gráfico 16 e Gráfico 17 é desde logo visível a influência dos fatores temperatura dos rolos e viscosidade do composto através da inclinação das retas. Ambas as interações em estudo apresentam indícios do seu impacto nos resultados, posteriormente confirmados na ANOVA.

Gráfico 16 - Efeitos principais para a razão S/N da adesividade.

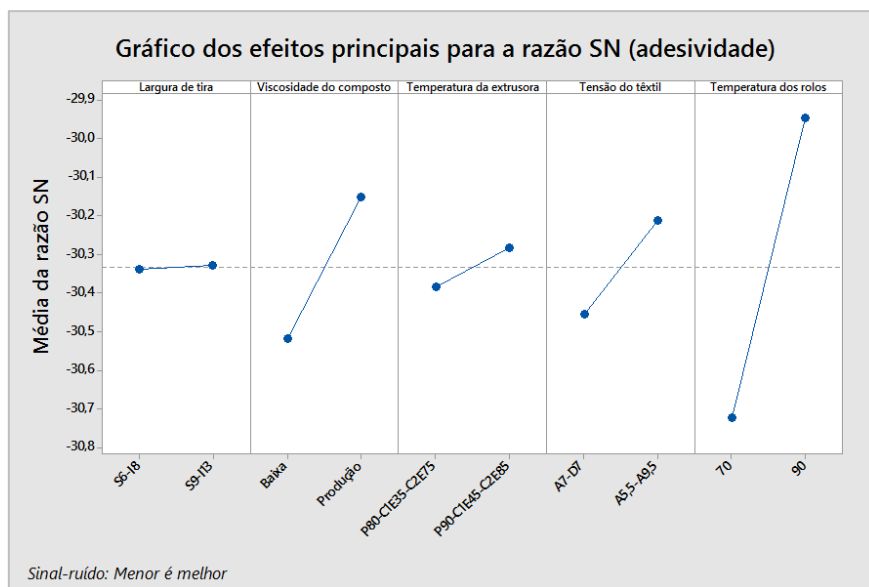
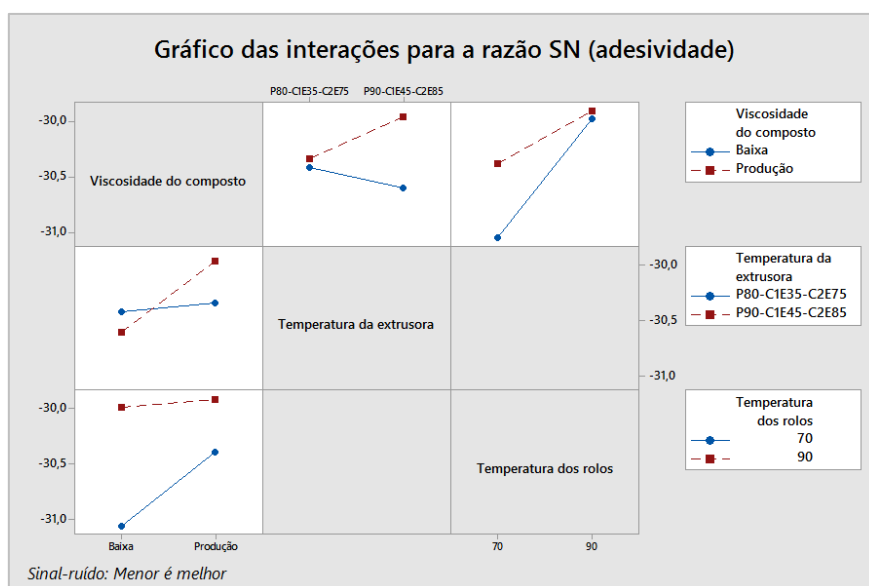


Gráfico 17 - Interações para a razão S/N da adesividade.



Por forma a validar as aferições anteriores, executou-se novamente a análise de variância aos parâmetros e interações para os resultados da adesividade. Desta surgem os resultados com maior sucesso, dado que para o grau de confiança estabelecido, onde apenas um fator dos considerados sofreu *pooling*, conseguindo um erro experimental com 4% de contribuição.

Obteve-se ainda o resultado mais expressivo com 61% de contribuição para a variação da adesividade (ver Tabela 15) para o parâmetro temperatura dos rolos. Como a adesividade é condicionada pela superfície do material, este resultado era expectável. No entanto, a tensão do têxtil não era previsto ter influência sobre os resultados pois é uma característica interna do material. Deverá ser selecionado o segundo nível de cada fator para produzir uma melhor a resposta da característica.

Tabela 15 - Análise de variância dos resultados da adesividade.

Fator	Descrição	Pooling	df	SS	V	F	SS'	Contribuição
	Interação BxC	n	1	0,16	0,16	15,69	0,16	8%
B	Viscosidade do composto	n	1	0,27	0,27	26,05	0,27	13%
C	Temperatura da extrusora	n	1			<i>Pooled*</i>		
D	Tensão do têxtil	n	1	0,12	0,12	11,50	0,12	5%
E	Temperatura dos rolos	n	1	1,21	1,21	117,92	1,21	61%
A	Largura de tira	s	1			<i>Pooled*</i>		
	Interação BXE	n	1	0,18	0,18	17,90	0,05	9%
	Erro* (Pooled)		2	0,02	0,01			4%
	Total		7					100%

### 6.3 Quadro resumo

De modo a simplificar e sumarizar os resultados obtidos, construiu-se um quadro (ver Tabela 16) com as informações relativas a cada propriedade da tela têxtil em estudo, identificando-se os parâmetros influentes e os níveis que conduzem ao incremento da qualidade segundo os objetivos estabelecidos.

Tabela 16 – Quadro resumo dos parâmetros influentes relativos a cada propriedade.

Parâmetros	Variação da Espessura	Green-Adhesion	Adesividade
Viscosidade do composto	Baixa		Produção
Temperatura da extrusora	P80-C1E35-C2E75	P90-C1E45-C2E85	
Tensão do têxtil		A5,5-D9,5	A5,5-D9,5
Temperatura dos rolos		70	90
Largura de tira			
Viscosidade*Temperatura da extrusora			Produção*P90-C1E45-C285
Viscosidade*Temperatura dos rolo	Baixa*70	Baixa*70	Produção*90

## 6.4 Validação

Por último, realizou-se a validação dos resultados experimentais tendo como base as os resultados alcançados para a redução da variação da espessura. Com esse intuito, foi concretizada uma nova experiência com as seguintes configurações:

- Viscosidade de composto: Baixa
- Temperatura da extrusora: P80-C1E35-C2E75
- Temperatura dos rolos: 70

Concluído o ensaio de validação, recolheram-se as amostras necessárias e obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 18, resumido na Tabela 17. Simultaneamente, através da ferramenta Minitab foram computados os resultados previstos para a experiência, suportando a decisão de validar ou não as condições impostas neste documento.

Analisando os dados é possível verificar uma diferença entre as médias da espessura obtida e prevista, fruto de uma diferente configuração do *gap* definido pela entidade para a validação. Porém, examinando os respectivos valores do desvio-padrão da espessura, averigua-se uma elevada proximidade do valor observado de 0,02 mm e do previsto de 0,01 mm, validando assim o resultado e consequentemente os pressupostos do estudo.

Tabela 17 - Quadro resumo dos resultados observados e previstos para a experiência de validação.

		<b>Espessura</b> (mm)	<b>Green-Adhesion</b> (N)	<b>Adesividade</b> (N)
Observados	Média	1,18	40	38,26
	Desvio-padrão	0,02	2	1,61
Previsão	Média	1,10	41	36,09
	Desvio-padrão	0,01	2	4,35

Relativamente às restantes propriedades, apenas poderão ser validados os valores observados em relação à previsão, dado que não foram impostos os níveis dos fatores que beneficiariam a resposta dessas características.

Ambas as propriedades apresentaram valores próximos dos esperados, onde o *green-adhesion* obteve um resultado de 40 N em comparação com os 41 N previstos, igualando o desvio-padrão.

Por outro lado, um olhar mais cuidado sobre os resultados da adesividade (ver Tabela 18) permite visualizar uma discrepância de dados na amostra central, conduzindo a uma análise errada dos resultados. Deste modo, eliminaram-se estes valores obtendo uma média de 38,26 N *versus* a previsão de 36,09 N, sendo tomado como válido o resultado da experiência.

Tabela 18 - Resultados da experiência de validação para as diferentes propriedades.

	Espessura (mm)	<i>Green-Adhesion</i> (N)	Adesividade (N)
LADO MOTOR (Direito)	1,18	42	39,46
	1,19	40	36,5
	1,2	41	37,53
	1,19	39	39,42
		39	38,97
CENTRO	1,16	41	30,48*
	1,16	41	32,08*
	1,18	39	29,59*
	1,19	41	32,88*
		37	33,98*
LADO OPERADOR (Esquerdo)	1,17	42	37,74
	1,18	43	34,79
	1,16	41	39,28
	1,15	41	39,84
		37	39,04

\* valores eliminados para efeitos de cálculo.



# CONCLUSÕES



## 7 CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido neste documento abordou um caso de estudo em ambiente industrial, incidindo principalmente na calandragem de material têxtil da Continental Mabor – Indústria de Pneus, S.A.

No decorrer deste relatório é descrita a metodologia utilizada para a solução deste problema, apresentando os procedimentos de monitorização do processo, análise dos sistemas de medição das propriedades do produto e realização de experiências segundo o Método de Taguchi.

A informação recolhida no acompanhamento do sistema produtivo permitiu uma comparação direta entre os dados obtidos dos sistemas de medição de espessura *online* e *offline*, atualizando-se os valores de *offset* do primeiro equipamento. Esta medida provocou uma melhoria na resposta do sistema, estabilizando o processo e recebendo relatos positivos dos operadores.

Paralelamente, efetuaram-se ensaios laboratoriais por forma a diminuir a variação do processo de medição da adesividade da tela têxtil. Dando uso aos conhecimentos transmitidos pelos intervenientes e debatendo o problema em equipa, foram seleccionados um conjunto de testes preliminares. Verificou-se que as condições de limpeza do dinamómetro por cada amostra, centragem e medição sem plástico na zona inferior da amostra causaram uma redução substancial do desvio-padrão, adotando-se estas configurações em testes futuros.

Tendo por base as etapas estabelecidas pelo Método de Taguchi, foi planeado e realizado um conjunto de experiências, analisando-se as propriedades espessura, *green-adhesion* e adesividade. Adquiridos os resultados das experiências, determinaram-se os parâmetros e interações influentes, assim como a sua contribuição.

Dos resultados da variação da espessura verificou-se que os fatores com impacto são constituídos pela viscosidade do composto, temperatura da extrusora e interação “viscosidade do composto × temperatura dos rolos”.

Para o *green-adhesion*, a análise dos dados identificou os parâmetros temperatura da extrusora, temperatura dos rolos, tensão do têxtil e a interação da viscosidade com a temperatura dos rolos como significativos para o modelo.

Relativamente à adesividade, todos os fatores mostraram-se com influência na resposta da qualidade, exceto a temperatura de extrusora e a largura de tira, previamente excluída.

Com isto, concretizaram-se os objetivos propostos para o caso de estudo. Esta abordagem permitiu um conhecimento mais aprofundado do processo e sistemas de medição associados, motivando a empresa a desenvolver este estudo, o que será realizado em trabalhos futuros.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Mark, J.E., B. Erman, and M. Roland, *The science and technology of rubber*. 2013: Academic press.
2. Eirich, F.R., *Science and Technology of Rubber*. 2012: Elsevier Science.
3. Tadmor, Z. and C.G. Gogos, *Principles of polymer processing*. 2013: John Wiley & Sons.
4. Freakley, P.K., *Rubber Processing and Production Organization*. 2012: Springer US.
5. Petrović, P.B., *Rubberized cord thickness measurement based on laser triangulation, Part II: Validation*. FME Transactions, 2007. **35**(2): p. 85-93.
6. Ott, R.L. and M.T. Longnecker, *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis*. 2015: Cengage Learning.
7. Corder, G.W. and D.I. Foreman, *Nonparametric statistics: A step-by-step approach*. 2014: John Wiley & Sons.
8. Hamilton, L.C., *Modern Data Analysis: A First Course in Applied Statistics*. 1990: Brooks/Cole Publishing Company.
9. Correia, E.A.S. and J.A.S. Cardoza, *Planejamento de experimentos no processo produtivo utilizando o método Taguchi*. Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas, 2011. **6**(1): p. 55.
10. Dehnad, K., *Quality Control, Robust Design, and the Taguchi Method*. 2012: Springer US.
11. Pyzdek, T. and P.A. Keller, *The six sigma handbook*. 2014: McGraw-Hill Education New York.
12. Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*. 2012: Wiley.
13. Roy, R.K., *A primer on the Taguchi method*. 1990: Van Nostrand Reinhold.
14. Taguchi, G., S. Chowdhury, and Y. Wu, *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. 2005: Wiley.
15. Phadke, M.S., *Quality Engineering Using Robust Design*. 1989: Prentice Hall.
16. Ross, P.J., *Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*. 1988: McGraw-Hill.



# ANEXOS

ANEXO A

ANEXO B

ANEXO C

ANEXO D

ANEXO E

ANEXO F

ANEXO G

ANEXO H

ANEXO I



# ANEXOS

## Anexo A

Tabela 19 – Experiências fatorial fracionado (adaptado Ross [16]).

			A1								A2								
			B1				B2				B1				B2				
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2		
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	
E1	F1	G1	■			■		■			■			■			■		
		G2		■		■			■			■			■			■	
	F2	G1		■		■			■			■			■			■	
		G2	■			■		■			■			■			■		
E2	F1	G1		■		■			■			■			■			■	
		G2	■			■		■			■			■			■		
	F2	G1		■		■			■			■			■			■	
		G2	■			■		■			■			■			■		

**½ FFE**

			A1								A2								
			B1				B2				B1				B2				
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2		
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	
E1	F1	G1	■			■		■			■			■			■		
		G2		■		■			■			■			■			■	
	F2	G1		■		■			■			■			■			■	
		G2	■			■		■			■			■			■		
E2	F1	G1		■		■			■			■			■			■	
		G2	■			■		■			■			■			■		
	F2	G1		■		■			■			■			■			■	
		G2	■			■		■			■			■			■		

**¼ FFE**

			A1								A2								
			B1				B2				B1				B2				
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2		
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	
E1	F1	G1	■			■			■			■			■			■	
		G2		■		■			■			■			■			■	
	F2	G1		■		■			■			■			■			■	
		G2	■			■		■			■			■			■		
E2	F1	G1		■		■			■			■			■			■	
		G2	■			■		■			■			■			■		
	F2	G1		■		■			■			■			■			■	
		G2	■			■		■			■			■			■		

**⅛ FFE**

Anexo B

Gráfico 18 - Gráficos lineares L8 (adaptado Phadke [15]).

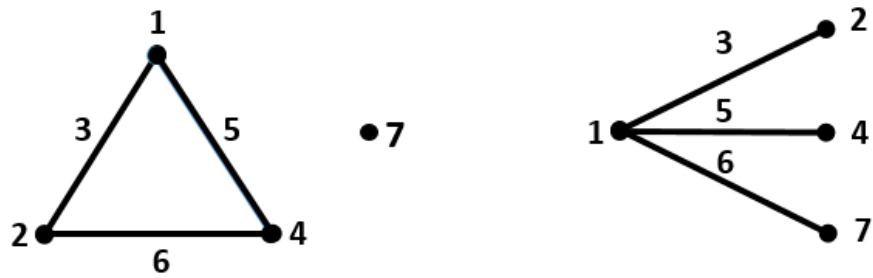
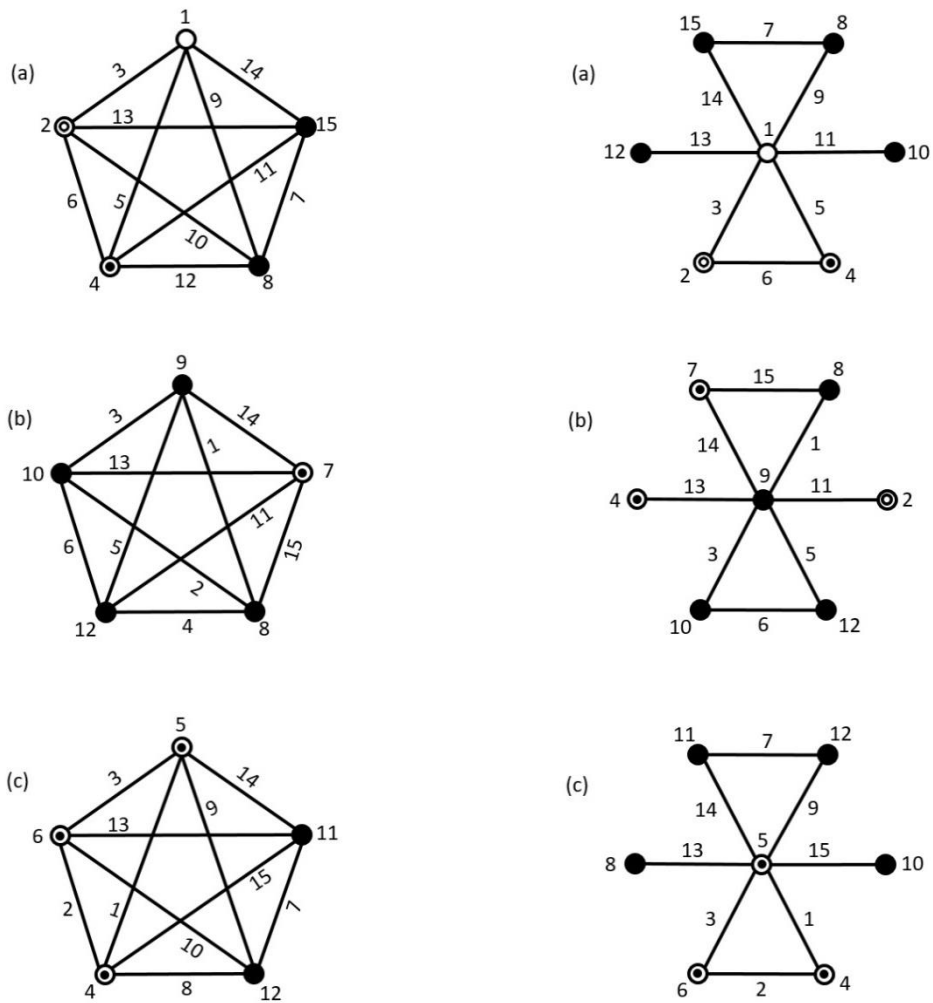


Gráfico 19 - Excerto de Gráficos Lineares L15 (adaptado [14]).



## Anexo C

Tabela 20 - Resolução das matrizes ortogonais (adaptado Ross [16]).

Número de ensaios	Número de níveis	Número de fatores	Resolução
4	2	1	4
4	2	2	4
4	2	3	1
8	2	1-3	4
8	2	4	2
8	2	5-7	1
9	3	1	4
9	3	2	4
9	3	3	1
9	3	4	1
16	2	1-4	4
16	2	5	3
16	2	6-8	2
16	2	9-15	1
18	3	1-8	1
27	3	1-3	4
27	3	4-13	1
32	2	1-5	4
32	2	6	3
32	2	7-16	2
32	2	17-31	1

**Legenda da resolução**

- 1** - Apenas os fatores podem ser estimados (efeitos principais confundidos com qualquer ordem de interação). Baixa resolução.
- 2** - Todos os fatores principais e grupos de interações entre dois fatores (todos os efeitos principais não são confundidos com interações de dois fatores; interações de dois fatores são confundidas entre si).
- 3** - Todos os fatores e interações entre dois fatores podem ser estimadas (todos os efeitos principais e interações de dois fatores não).
- 4** - Todos os efeitos principais e todas as interações podem ser estimadas. Alta resolução.

## Anexo D

Tabela 21 – Resultados dos testes preliminares para o método de medição da adesividade (em N).

Material	Fator	Número de amostras	Média	Desvio-padrão	Média -3 $\sigma$	Média +3 $\sigma$
R1564	LIMPEZA 1 A 1	29	19,25	2,28	12,40	26,10
	LIMPEZA 5 EM 5	30	17,18	2,44	9,86	24,49
	BLEEDER RETIRADO	30	17,68	2,54	10,06	25,30
	SEM BLEEDER	30	17,14	2,47	9,73	24,56
	COM BLEEDER	30	16,05	2,70	7,95	24,14
	CENTRADO	30	15,53	1,64	10,62	20,44
	DESCENTRADO	30	15,37	2,13	8,97	21,78
R3002	PICOTADO	25	15,94	2,35	8,90	22,97
	NÃO PICOTADO	25	19,97	2,40	12,78	27,16
	PRIMEIRA MEDIÇÃO	25	19,97	2,40	12,78	27,16
	SEGUNDA MEDIÇÃO	25	21,17	2,85	12,61	29,72
	TERCEIRA MEDIÇÃO	25	21,33	2,58	13,59	29,08
P1319/ R3002	COM PLÁSTICO P1319	30	19,30	3,07	10,09	28,50
	SEM PLÁSTICO P1319	30	28,89	0,92	26,14	31,64
	COM PLÁSTICO R3002	13	19,22	2,86	10,63	27,80
	SEM PLÁSTICO R3002	13	30,06	0,74	27,84	32,28
P1319	FIXADO COM PLÁSTICO	19	16,27	2,85	7,71	24,83
	FIXADO SEM PLÁSTICO	19	28,25	1,66	23,29	33,22

## Anexo E

Tabela 22 – Resultados da análise de correlações segundo Spearman para o P1319 e P1365 (calandra 1).


		Equipa	Velocidade (calandragem)	Vel. Moinho Aliment.	Vel. Moinho Homogen.	Largura de Tira Sup.	Largura de Tira Inf.	Tensão Pré-Aquec.	Tensão Pós-Aquec.	Temperatura Rolo1	Temperatura Rolo2	Temperatura Rolo3	Temperatura Rolo4	Temperatura Camisas. Int.	Temperatura Camisas. Ext.	Vel. Extrusora	Tensão Desem.	Tensão Enrolam.	Temp. Enrolam.	
P1319	Esp. Online Lado Esq.	Correlation Coefficient	,033	,064	,308	,440	,693**	,142	,687	,060	,171	-,358	-,630	,610	-,082	,154	,019	-,029	-,110	-,200
		Sig. (2-tailed)	,912	,829	,284	,115	,006	,628	,060	,888	,686	,385	,094	,108	,846	,715	,950	,926	,709	,492
	Esp. Offline Lado Esq.	Correlation Coefficient	,050	,002	,314	,409	,687**	,345	,523	-,106	-,069	-,360	-,479	-,163	,347	0,000	-,102	,090	-,209	,291
		Sig. (2-tailed)	,866	,994	,274	,146	,007	,227	,148	,786	,861	,341	,192	,675	,361	1,000	,740	,771	,473	,314
	Esp. Online Centro	Correlation Coefficient	,169	,318	,413	,457	,565	,467	-,253	-,659	-,366	-,166	-,252	-,146	-,412	-,231	-,365	,221	,177	-,516
		Sig. (2-tailed)	,620	,340	,206	,157	,070	,148	,545	,076	,373	,694	,547	,729	,310	,581	,269	,539	,604	,104
	Esp. Offline Centro	Correlation Coefficient	,348	-,041	,615*	,701**	,413	,570*	,309	-,072	,299	-,124	-,377	,188	-,138	,065	-,099	,143	,001	,292
		Sig. (2-tailed)	,223	,890	,019	,005	,142	,033	,418	,854	,434	,751	,318	,628	,723	,868	,748	,640	,997	,311
	Esp. Online Lado Dir.	Correlation Coefficient	-,109	,409	,056	-,161	-,012	-,483	-,505	-,126	,334	,056	,158	,111	-,612	-,060	-,091	-,648	,337	-,189
		Sig. (2-tailed)	,764	,241	,878	,658	,973	,157	,248	,788	,465	,905	,735	,812	,144	,899	,802	,059	,340	,601
	Esp. Offline Lado Dir.	Correlation Coefficient	,367	-,112	,614*	,627*	,294	,276	,146	-,128	,459	,081	-,081	-,459	,350	-,165	-,142	,251	,031	,374
		Sig. (2-tailed)	,197	,703	,019	,017	,308	,340	,708	,742	,214	,836	,835	,214	,356	,672	,643	,408	,917	,188
P1365	Esp. Online Lado Esq.	Correlation Coefficient	-,561	,458	,176	,185	,354	,552	-,108	,240	,447	-,078	-,412	,356	,144	-,668	-,165	-,434	,109	-,209
		Sig. (2-tailed)	,116	,215	,651	,634	,349	,123	,798	,568	,267	,854	,310	,387	,758	,101	,671	,244	,797	,589
	Esp. Offline Lado Esq.	Correlation Coefficient	-,468	-,252	-,398	-,326	,463	,683*	-,359	-,471	-,492	,170	-,138	-,459	,620	-,409	-,474	,081	-,350	-,071
		Sig. (2-tailed)	,125	,429	,200	,301	,129	,014	,343	,201	,179	,662	,724	,214	,101	,314	,141	,802	,292	,827
	Esp. Online Centro	Correlation Coefficient	-,258	,807**	,519	,504	,658	,377	-,024	,395	,639	-,047	-,247	,491	0,000	-,535	-,366	,137	,327	-,753*
		Sig. (2-tailed)	,502	,009	,152	,166	,054	,318	,955	,333	,088	,912	,555	,217	1,000	,216	,333	,725	,429	,019
	Esp. Offline Centro	Correlation Coefficient	,115	-,108	-,291	-,360	,247	,520	-,202	-,560	-,406	-,198	-,350	-,282	,697	-,464	-,685*	,293	-,382	-,260
		Sig. (2-tailed)	,723	,738	,358	,250	,439	,083	,603	,117	,278	,609	,356	,462	,055	,247	,020	,356	,247	,415
	Esp. Online Lado Dir.	Correlation Coefficient	-,499	,598	-,109	-,067	,700*	-,008	-,060	,359	,064	,483	,247	-,086	0,000	-,267	-,122	-,342	,327	-,360
		Sig. (2-tailed)	,172	,089	,781	,864	,036	,983	,887	,382	,881	,225	,555	,840	1,000	,562	,755	,367	,429	,342
	Esp. Offline Lado Dir.	Correlation Coefficient	-,229	-,006	-,571	-,545	,512	,414	-,460	-,479	-,637	,500	,275	-,771*	,283	-,274	-,377	,011	-,494	-,126
		Sig. (2-tailed)	,473	,986	,052	,067	,089	,181	,213	,192	,065	,170	,474	,015	,496	,511	,252	,973	,122	,696

  Correlação positiva significativa

  Correlação negativa significativa

Tabela 23 - Resultados da análise de correlações segundo Spearman para o P1370 e P1377 (calandra 1).

		Equipa	Velocidade (calandragem)	Vel. Moinho Aliment.	Vel. Moinho Homogen.	Largura de Tira Sup.	Largura de Tira Inf.	Tensão Pré-Aquec.	Tensão Pós-Aquec.	Temperatura Rolo1	Temperatura Rolo2	Temperatura Rolo3	Temperatura Rolo4	Temperatura Camisas. Int.	Temperatura Camisas. Ext.	Vel. Extrusora	Tensão Desem.	Tensão Enrolam.	Temp. Enrolam.	
P1370	Esp. Online Lado Esq.	Correlation Coefficient	-,395	,016	-,782**	-,506	,374	,690*	,439	,360	,639	-,260	-,411	,292	,137	,139	,342	0,000	,131	-,073
		Sig. (2-tailed)	,229	,963	,004	,112	,257	,019	,237	,342	,064	,500	,272	,446	,725	,720	,304	1,000	,702	,832
	Esp. Offline Lado Esq.	Correlation Coefficient	-,369	,025	-,530	-,423	,533*	,369	,456	,130	,620*	-,059	-,204	-,041	-,206	,500	,187	-,043	,223	-,114
		Sig. (2-tailed)	,194	,933	,051	,132	,050	,194	,158	,703	,042	,864	,548	,906	,543	,117	,541	,883	,443	,710
	Esp. Online Centro	Correlation Coefficient	-,053	-,337	-,457	-,366	,185	,596	,329	,226	,365	-,173	-,137	,201	0,000	-,090	,577	-,207	,205	0,000
		Sig. (2-tailed)	,893	,376	,216	,333	,634	,090	,387	,559	,334	,656	,725	,604	1,000	,819	,104	,593	,597	1,000
	Esp. Offline Centro	Correlation Coefficient	,340	-,249	-,073	-,244	,327	,097	,417	-,098	,186	,088	,102	-,081	-,413	,256	-,285	-,215	,099	-,376
		Sig. (2-tailed)	,234	,391	,803	,401	,254	,741	,201	,775	,584	,796	,765	,812	,207	,447	,345	,461	,738	,206
	Esp. Online Lado Dir.	Correlation Coefficient	-,632	-,069	-,755*	-,877**	,336	,638	,152	,586	,420	,173	,274	,420	0,000	-,129	,427	,104	-,093	,033
		Sig. (2-tailed)	,068	,859	,019	,002	,376	,064	,696	,097	,260	,656	,476	,260	1,000	,740	,252	,791	,812	,932
	Esp. Offline Lado Dir.	Correlation Coefficient	-,385	-,108	-,485	-,697**	,239	,047	,249	-,005	,067	-,119	,360	-,475	-,069	,530	,201	,329	-,059	,138
		Sig. (2-tailed)	,175	,713	,079	,006	,410	,874	,460	,989	,846	,728	,277	,139	,839	,094	,509	,250	,841	,654
P1377	Esp. Online Lado Esq.	Correlation Coefficient	,112	0,000	-,300	-,205	-,200	,103	,316	,800	-,738	,258	,258	-,949	-,258	-,949	-,500	,289	,564	,200
		Sig. (2-tailed)	,858	1,000	,624	,741	,747	,870	,684	,200	,262	,742	,742	,051	,742	,051	,391	,638	,322	,800
	Esp. Offline Lado Esq.	Correlation Coefficient	,068	-,123	-,257	-,174	-,174	,116	,316	,800	-,738	,258	,258	-,949	-,258	-,949	-,371	,185	,638	,100
		Sig. (2-tailed)	,899	,816	,623	,742	,742	,827	,684	,200	,262	,742	,742	,051	,742	,051	,468	,725	,173	,873
	Esp. Online Centro	Correlation Coefficient	-,169	-,123	,257	,319	-,116	,029	,316	1,000**	-,211	-,258	-,258	-,949	,258	-,632	-,314	-,062	,698	0,000
		Sig. (2-tailed)	,749	,816	,623	,538	,827	,957	,684		,789	,742	,742	,051	,742	,368	,544	,908	,123	1,000
	Esp. Offline Centro	Correlation Coefficient	-,171	-,564	,116	,235	-,162	,441	-,211	,400	-,738	,258	,258	-,632	-,258	-,949	,116	,376	,955**	-,410
		Sig. (2-tailed)	,745	,244	,827	,654	,759	,381	,789	,600	,262	,742	,742	,368	,742	,051	,827	,463	,003	,493
	Esp. Online Lado Dir.	Correlation Coefficient	-,270	-,802	,200	,290	,116	,464	-,949	-,400	,105	-,258	-,258	,316	,258	-,105	,771	0,000	,638	-,200
		Sig. (2-tailed)	,604	,055	,704	,577	,827	,354	,051	,600	,895	,742	,742	,684	,742	,895	,072	1,000	,173	,747
	Esp. Offline Lado Dir.	Correlation Coefficient	-,539	-,853*	,091	,154	-,585	,893*	0,000	-,316	-,833	,816	,816	0,000	-,816	-,500	,455	,525	,742	-,667
		Sig. (2-tailed)	,270	,031	,864	,771	,222	,016	1,000	,684	,167	,184	,184	1,000	,184	,500	,364	,285	,091	,219

 Correlação positiva significativa



 Correlação negativa significativ

Tabela 24 - Resultados da análise de correlações segundo Spearman para o R1564 e R3002 (calandra 1).

		Equipa	Velocidade (calandragem)	Vel. Moinho Aliment.	Vel. Moinho Homogen.	Largura de Tira Sup.	Largura de Tira Inf.	Tensão Pré-Aquec.	Tensão Pós-Aquec.	Temperatura Rolo1	Temperatura Rolo2	Temperatura Rolo3	Temperatura Rolo4	Temperatura Camisas. Int.	Temperatura Camisas. Ext.	Vel. Extrusora	Tensão Desem.	Tensão Enrolam.	Temp. Enrolam.	
R1564	Esp. Online Lado Esq.	Correlation Coefficient	-,144	-,657	,764*	,800*	-,055	,847*	-,371	0,000	,029	,131	0,000	,655	-,131	-,088	,339	0,000	,424	,334
		Sig. (2-tailed)	,758	,109	,046	,031	,908	,016	,468	1,000	,957	,805	1,000	,158	,805	,868	,510	1,000	,343	,518
	Esp. Offline Lado Esq.	Correlation Coefficient	-,874*	0,000	-,330	-,239	,312	,236	,029	,441	,191	,664	0,000	,664	-,664	-,284	,376	-,525	,156	,092
		Sig. (2-tailed)	,010	1,000	,469	,606	,496	,610	,957	,381	,717	,150	1,000	,150	,150	,586	,463	,226	,739	,862
	Esp. Online Centro	Correlation Coefficient	,433	-,239	,364	,436	-,109	,577	,486	,580	,841*	-,131	0,000	,655	,131	,441	-,185	-,039	,116	-,759
		Sig. (2-tailed)	,332	,606	,423	,328	,816	,175	,329	,228	,036	,805	1,000	,158	,805	,381	,725	,935	,805	,080
	Esp. Offline Centro	Correlation Coefficient	-,792	-,141	-,162	-,090	,647	,088	-,359	0,000	-,132	,181	0,000	,725	-,181	-,263	,740	-,861*	0,000	,103
		Sig. (2-tailed)	,060	,790	,759	,866	,165	,868	,553	1,000	,833	,770	1,000	,165	,770	,669	,152	,028	1,000	,870
	Esp. Online Lado Dir.	Correlation Coefficient	,289	,060	,055	,145	-,527	,631	,714	,812*	,986**	,393	0,000	,393	-,393	,177	-,278	,193	,154	-,820*
		Sig. (2-tailed)	,530	,899	,908	,756	,224	,129	,111	,050	,000	,441	1,000	,441	,441	,738	,594	,679	,741	,046
	Esp. Offline Lado Dir.	Correlation Coefficient	-,510	-,241	,101	,138	,395	,391	-,200	,145	,319	,131	0,000	,655	-,131	0,000	,185	-,778*	-,234	-,031
		Sig. (2-tailed)	,243	,602	,830	,769	,381	,386	,704	,784	,538	,805	1,000	,158	,805	1,000	,725	,039	,614	,954
R3002	Esp. Online Lado Esq.	Correlation Coefficient	-,289	-,289	-,616	-,462	-,051	-,200	-,667	-,718	-,289	0,000	0,000	,447	,707	-,667	,700	,707	,894*	,200
		Sig. (2-tailed)	,638	,638	,269	,434	,935	,747	,219	,172	,638	1,000	1,000	,450	,182	,219	,188	,182	,041	,800
	Esp. Offline Lado Esq.	Correlation Coefficient	-,495	-,626	-,750	-,691	,092	-,493	-,526	-,658	-,444	-,148	0,000	,344	,725	-,789	,145	-,171	,360	,667
		Sig. (2-tailed)	,318	,183	,086	,128	,862	,321	,362	,227	,454	,812	1,000	,571	,165	,112	,784	,745	,483	,219
	Esp. Online Centro	Correlation Coefficient	-,577	-,577	-,667	-,205	-,821	-,900*	-,718	,205	0,000	,866	0,000	-,224	,354	,564	-,100	0,000	,224	-,200
		Sig. (2-tailed)	,308	,308	,219	,741	,089	,037	,172	,741	1,000	,058	1,000	,718	,559	,322	,873	1,000	,718	,800
	Esp. Offline Centro	Correlation Coefficient	-,408	-,516	-,667	-,667	,127	-,359	-,406	-,730	-,304	-,304	0,000	,471	,559	-,811	,359	0,000	,495	,632
		Sig. (2-tailed)	,422	,294	,148	,148	,811	,485	,498	,161	,619	,619	1,000	,423	,327	,096	,485	1,000	,318	,252
	Esp. Online Lado Dir.	Correlation Coefficient	,577	,577	,564	,410	,616	,500	-,103	-,308	0,000	,289	0,000	,224	,354	-,359	-,500	-,707	-,447	-,800
		Sig. (2-tailed)	,308	,308	,322	,493	,269	,391	,870	,614	1,000	,638	1,000	,718	,559	,553	,391	,182	,450	,200
Esp. Offline Lado Dir.	Correlation Coefficient	0,000	-,194	-,243	-,303	,635	0,000	-,162	-,730	-,304	-,304	0,000	,471	,559	-,973**	0,000	-,354	0,000	,211	
	Sig. (2-tailed)	1,000	,713	,643	,559	,176	1,000	,794	,161	,619	,619	1,000	,423	,327	,005	1,000	,492	1,000	,734	

 Correlação positiva significativa


 Correlação negativa significativ

Tabela 25 - Resultados da análise de correlações segundo Spearman para o P1319 (calandra 2).

		Velocidade (calandragem)	Vel. Moinho Homog.	Largura de Tira Sup.	Largura de Tira Inf.	Tensão Pré-Aquec.	Tensão Pós-Aquec.	Temperatura Rolo1	Temperatura Rolo2	Temperatura Rolo3	Temperatura Rolo4	Temperatura Paraf. Ext.	Temperatura Cilindro. Ext.	Temperatura Cabeça Ext.	Temperatura do composto	Extrusora	Tensão Desem.	Tensão Enrolam.	Temperatura Enrolam.	
P1319	Esp. Online Lado Esq.	Correlation Coefficient	-,456	,204	,225	-,009	-,123	-,464	,029	,212	-,208	0,000	-,430	,234	-,372	-,361	-,092	,010	,434	,229
		Sig. (2-tailed)	,101	,525	,439	,976	,674	,095	,923	,467	,476	1,000	,125	,420	,190	,249	,754	,973	,121	,430
	Esp. Offline Lado Esq.	Correlation Coefficient	,078	,060	,263	,069	-,010	-,063	,426	-,158	-,166	-,574*	,008	-,282	-,117	-,319	-,634*	,169	-,254	,336
		Sig. (2-tailed)	,790	,853	,364	,813	,972	,830	,128	,590	,570	,032	,979	,329	,691	,312	,015	,563	,380	,239
	Esp. Online Lado Esq._2	Correlation Coefficient	-,456	,160	-,022	-,057	,002	-,292	-,023	,558*	,330	,405	-,430	,276	-,151	,186	,479	-,104	,416	-,068
		Sig. (2-tailed)	,101	,619	,940	,845	,994	,311	,937	,038	,249	,151	,125	,340	,607	,564	,083	,724	,139	,816
	Esp. Offline Lado Esq._2	Correlation Coefficient	0,000	,046	,007	,423	-,207	-,261	,301	-,048	-,126	-,614*	,108	-,123	,061	-,044	-,506	,136	-,332	,266
		Sig. (2-tailed)	1,000	,887	,982	,170	,519	,413	,342	,882	,697	,034	,739	,703	,851	,891	,093	,673	,291	,403
	Esp. Online Centro	Correlation Coefficient	-,101	,036	,373	-,261	-,472	-,111	-,429	,057	-,248	,456	,366	,310	,059	,137	,007	-,479	,381	-,112
		Sig. (2-tailed)	,730	,911	,189	,368	,088	,704	,126	,848	,393	,101	,199	,281	,840	,672	,981	,083	,179	,702
	Esp. Offline Centro	Correlation Coefficient	,365	-,154	-,137	-,029	,077	,133	,373	-,459	-,091	-,617*	,358	-,361	,177	-,160	-,651*	,075	-,495	,370
		Sig. (2-tailed)	,200	,632	,641	,921	,794	,649	,189	,099	,756	,019	,208	,205	,545	,619	,012	,798	,072	,193
	Esp. Online Lado Dir._2	Correlation Coefficient	0,000	-,779*	-,139	-,013	-,335	-,011	-,213	-,033	,293	-,051	,119	-,107	-,295	-,161	-,154	,294	,458	-,044
		Sig. (2-tailed)	1,000	,003	,635	,964	,241	,970	,464	,911	,310	,864	,686	,715	,306	,617	,599	,308	,099	,881
	Esp. Offline Lado Dir._2	Correlation Coefficient	0,000	-,221	,286	,002	-,271	-,047	,456	,228	,222	-,567*	-,105	-,423	-,268	-,402	-,652*	,063	-,043	,265
		Sig. (2-tailed)	1,000	,490	,368	,996	,395	,884	,136	,476	,489	,055	,744	,171	,400	,195	,022	,846	,894	,404
	Esp. Online Lado Dir.	Correlation Coefficient	,051	-,706*	-,272	-,230	-,064	,129	,252	-,005	,528	-,051	,173	-,164	,043	,035	-,253	,257	,194	,011
		Sig. (2-tailed)	,864	,010	,348	,429	,828	,659	,384	,987	,052	,864	,554	,576	,883	,914	,383	,376	,507	,970
Esp. Offline Lado Dir.	Correlation Coefficient	,039	-,119	,079	,051	-,062	-,117	,457	-,109	-,023	-,524	,171	-,281	,017	-,184	-,572*	,050	-,294	,509	
	Sig. (2-tailed)	,898	,714	,797	,869	,841	,703	,117	,724	,941	,066	,576	,353	,955	,568	,041	,872	,329	,075	

Correlação positiva significativa
  Correlação negativa significativa

Tabela 26 - Resultados da análise de correlações segundo Spearman para o P1365 (calandra 2).

		Velocidade (calandragem)	Vel. Moinho Homog.	Largura de Tira Sup.	Largura de Tira Inf.	Tensão Pré-Aquec.	Tensão Pós-Aquec.	Temperatura Rolo1	Temperatura Rolo2	Temperatura Rolo3	Temperatura Rolo4	Temperatura Paraf. Ext.	Temperatura Cilindro. Ext.	Temperatura Cabeça Ext.	Temperatura do composto	Extrusora	Tensão Desem.	Tensão Enrolam.	Temperatura Enrolam.	
P1365	Esp. Online Lado Esq.	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	-,707 ,182	,738 ,262	,316 ,684	0,000 1,000	-,400 ,505	-,100 ,873	-,738 ,155	-,289 ,638	,289 ,638	0,000 1,000	-,738 ,155	,671 ,215	,369 ,541	,600 ,400	,354 ,559	-,224 ,718	,900* ,037	-,051 ,935
	Esp. Offline Lado Esq.	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	-,745 ,148	,943 ,057	,333 ,667	,158 ,800	-,527 ,361	-,053 ,933	-,806 ,100	-,304 ,619	,304 ,619	0,000 1,000	-,556 ,331	,825 ,086	,472 ,422	,894 ,106	,559 ,327	-,354 ,559	,949* ,014	-,216 ,727
	Esp. Online Lado Esq. 2	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000 1,000	,738 ,262	,949 ,051	-,300 ,624	,100 ,873	-,500 ,391	-,527 ,361	-,866 ,058	,866 ,058	0,000 1,000	-,211 ,734	,224 ,718	,791 ,111	,600 ,400	,354 ,559	,447 ,450	,600 ,285	,616 ,269
	Esp. Offline Lado Esq. 2	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000 1,000	,833 ,167	,500 ,667	,632 ,368	,632 ,368	,316 ,684	0,000 1,000	-,707 ,293	,707 ,293	0,000 1,000	0,000 1,000	0,000 1,000	,833 ,167	,632 ,368	,816 ,184	,816 ,184	,316 ,684	,500 ,500
	Esp. Online Centro	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	,354 ,559	,738 ,262	,949 ,051	-,600 ,285	,300 ,624	-,700 ,188	-,316 ,604	-,866 ,058	,866 ,058	0,000 1,000	-,053 ,933	-,112 ,858	,632 ,252	,600 ,400	0,000 1,000	,671 ,215	,300 ,624	,872 ,054
	Esp. Offline Centro	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	-,791 ,111	,544 ,456	,056 ,944	,335 ,581	-,224 ,718	,335 ,581	-,412 ,490	0,000 1,000	0,000 1,000	0,000 1,000	-,825 ,086	,500 ,391	,177 ,776	,258 ,742	,395 ,510	-,250 ,685	,671 ,215	-,229 ,710
	Esp. Online Lado Dir. 2	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	-,354 ,559	,738 ,262	,632 ,368	-,100 ,873	0,000 1,000	-,200 ,747	-,527 ,361	-,577 ,308	,577 ,308	0,000 1,000	-,580 ,306	,335 ,581	,580 ,306	,600 ,400	,354 ,559	,224 ,718	,700 ,188	,359 ,553
	Esp. Offline Lado Dir. 2	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000 1,000	,500 ,500	,866 ,333	-,316 ,684	,316 ,684	-,316 ,684	-,500 ,500	-,707 ,293	,707 ,293	0,000 1,000	-,707 ,293	0,000 1,000	,500 ,500	,316 ,684	0,000 1,000	,816 ,184	,632 ,368	1,000**
	Esp. Online Lado Dir.	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	-,354 ,559	,211 ,789	,632 ,368	-,200 ,747	,100 ,873	-,100 ,873	-,316 ,604	-,289 ,638	,289 ,638	0,000 1,000	-,791 ,111	,112 ,858	,211 ,734	0,000 1,000	0,000 1,000	,224 ,718	,500 ,391	,359 ,553
	Esp. Offline Lado Dir.	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	-,707 ,182	,316 ,684	-,738 ,262	,900* ,037	-,200 ,747	,800 ,104	-,053 ,933	,289 ,638	-,289 ,638	0,000 1,000	-,316 ,604	,447 ,450	,105 ,866	,200 ,800	,707 ,182	-,447 ,450	,300 ,624	-,667 ,219

  Correlação positiva significativa
   Correlação negativa significativa

Tabela 27 - Resultados da análise de correlações segundo Spearman para o P1370 (calandra 2).

		Velocidade (calandragem)	Vel. Moinho Homog.	Largura de Tira Sup.	Largura de Tira Inf.	Tensão Pré-Aquec.	Tensão Pós-Aquec.	Temperatura Rolo1	Temperatura Rolo2	Temperatura Rolo3	Temperatura Rolo4	Temperatura Paraf. Ext.	Temperatura Cilindro. Ext.	Temperatura Cabeça Ext.	Temperatura do composto	Extrusora	Tensão Desem.	Tensão Enrolam.	Temperatura Enrolam.	
P1370	Esp. Online Lado Esq.	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	-,225	,088	-,396	,685	-,144	0,000	,073	,159	,289	,474	-,110	,189	,357	-,327	,866*	,857*	-,527
			1,000	,628	,868	,379	,090	,758	1,000	,876	,733	,530	,282	,814	,685	,432	,474	,012	,014	,224
	Esp. Offline Lado Esq.	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	-,047	,088	-,073	,191	,436	,048	-,148	-,101	-,218	-,319	,620	,563	,432	-,550	0,000	-,054	-,541
			1,000	,920	,868	,877	,682	,328	,919	,751	,830	,638	,485	,137	,189	,333	,200	1,000	,908	,210
	Esp. Online Lado Esq. 2	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	-,898**	-,265	,072	,468	,180	-,567	-,661	,159	0,000	,158	,184	0,000	0,000	-,727	,577	,429	-,127
			1,000	,006	,612	,878	,289	,699	,184	,106	,733	1,000	,735	,694	1,000	1,000	,064	,175	,337	,786
	Esp. Offline Lado Esq. 2	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	,078	-,227	,283	-,142	,491	,198	-,048	,094	-,151	-,746	,519	,307	,243	-,295	-,529	-,449	-,324
			1,000	,867	,665	,538	,762	,263	,670	,918	,841	,746	,054	,232	,503	,599	,520	,222	,312	,478
	Esp. Online Centro	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	-,056	,088	-,198	,559	,126	,189	-,092	,139	0,000	-,316	,294	,643	,643	-,636	,144	,250	-,800*
			1,000	,905	,868	,670	,192	,788	,685	,845	,766	1,000	,490	,523	,120	,119	,124	,758	,589	,031
	Esp. Offline Centro	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	,248	-,179	,211	,083	,211	,481	,159	,325	0,000	-,805*	,252	,346	,400	-,231	-,514	-,273	-,593
			1,000	,592	,734	,650	,860	,650	,274	,734	,478	1,000	,029	,585	,447	,374	,617	,237	,554	,161
	Esp. Online Lado Dir. 2	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	-,337	,088	,270	,396	,018	,189	-,110	,498	-,289	-,158	,312	-,057	-,036	-,436	,289	,250	-,727
			1,000	,460	,868	,558	,379	,969	,685	,814	,255	,530	,735	,496	,904	,939	,328	,530	,589	,064
	Esp. Offline Lado Dir. 2	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	,255	,224	-,282	,191	,136	,143	-,074	-,231	-,073	-,399	,259	,763*	,631	-,385	-,291	-,180	-,395
			1,000	,581	,670	,540	,682	,771	,760	,875	,618	,877	,375	,574	,046	,129	,393	,526	,699	,381
	Esp. Online Lado Dir.	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	-,225	,265	-,360	,901**	-,396	,094	-,202	,279	,144	0,000	-,220	,529	,607	-,636	,433	,607	-,764*
			1,000	,628	,612	,427	,006	,379	,840	,664	,545	,758	1,000	,635	,222	,148	,124	,332	,148	,046
Esp. Offline Lado Dir.	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	,155	,224	-,262	,224	,224	,098	-,114	-,227	-,150	-,328	,400	,745	,593	-,472	-,150	-,111	-,472	
		1,000	,739	,670	,571	,629	,629	,834	,807	,624	,749	,472	,374	,055	,161	,285	,749	,812	,285	

  Correlação positiva significativa
   Correlação negativa significativa

Tabela 28 - Resultados da análise de correlações segundo Spearman para o R1564 (calandra 2).

		Velocidade (calandragem)	Vel. Moinho Homog.	Largura de Tira Sup.	Largura de Tira Inf.	Tensão Pré-Aquec.	Tensão Pós-Aquec.	Temperatura Rolo1	Temperatura Rolo2	Temperatura Rolo3	Temperatura Rolo4	Temperatura Paraf. Ext.	Temperatura Cilindro. Ext.	Temperatura Cabeça Ext.	Temperatura do composto	Extrusora	Tensão Desem.	Tensão Enrolam.	Temperatura Enrolam.	
R1564	Esp. Online Lado Esq.	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	-.695*	,175	-,433	,187	,132	,145	,019	-,266	-,348	-,315	,577	-,348	-,318	,047	-,420	,014	,383
			1,000	,018	,607	,184	,582	,698	,690	,958	,458	,324	,345	,063	,294	,340	,891	,198	,968	,246
	Esp. Offline Lado Esq.	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	,080	,032	0,000	,162	,364	-,052	,034	,205	,333	,504	,001	,689**	,668*	-,044	-,025	,183	-,068
			1,000	,795	,918	1,000	,596	,222	,872	,916	,523	,291	,079	,996	,009	,013	,887	,935	,549	,825
	Esp. Online Lado Esq. 2	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	,238	,214	,578*	-,530	-,067	,618*	,100	-,359	,075	-,406	,288	-,366	-,301	,165	-,191	-,403	,095
			1,000	,457	,504	,049	,076	,836	,043	,769	,279	,828	,190	,364	,241	,342	,609	,551	,194	,768
	Esp. Offline Lado Esq. 2	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	,527	-,195	,375	,151	,310	-,135	,298	,233	,398	,320	-,375	,420	,520	,128	,069	,036	-,288
			1,000	,064	,522	,207	,621	,302	,675	,348	,467	,200	,286	,206	,153	,068	,678	,824	,906	,340
	Esp. Online Centro	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	,034	,631*	,455	-,235	-,086	,353	-,024	-,120	,522	,238	,218	,122	,231	,465	-,221	,081	,431
			1,000	,917	,028	,137	,462	,791	,287	,944	,726	,100	,457	,496	,705	,471	,128	,490	,803	,162
	Esp. Offline Centro	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	,026	-,116	,048	,072	,051	-,183	-,078	,515	,279	,426	-,006	,752**	,734**	,106	,263	,018	-,333
			1,000	,934	,705	,876	,814	,868	,569	,810	,087	,380	,147	,984	,003	,004	,731	,385	,953	,266
	Esp. Online Lado Dir. 2	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	-,098	,164	,105	-,193	-,183	,118	-,669*	,478	,298	,278	,052	,564	,455	,190	,265	-,004	-,290
			1,000	,762	,610	,745	,548	,570	,730	,024	,137	,373	,381	,873	,056	,138	,554	,405	,991	,361
	Esp. Offline Lado Dir. 2	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	,425	-,361	,549	-,081	-,067	,045	,342	,269	,504	,310	,096	,413	,404	,045	-,079	-,049	-,074
			1,000	,148	,225	,052	,794	,827	,889	,277	,398	,095	,302	,756	,160	,171	,885	,797	,874	,811
	Esp. Online Lado Dir.	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	-,053	,103	,193	-,214	-,268	,074	-,559	,299	,373	,172	,044	,377	,329	,414	,177	-,021	-,251
			1,000	,871	,749	,549	,504	,399	,830	,074	,372	,259	,593	,891	,227	,297	,181	,583	,948	,432
Esp. Offline Lado Dir.	Correlation Coefficient Sig. (2-tailed)	0,000	,443	-,352	,388	-,010	,306	,013	,489	,152	,099	0,000	-,010	,218	,293	-,017	,026	-,176	-,278	
		1,000	,130	,239	,190	,974	,309	,967	,107	,636	,759	1,000	,973	,475	,332	,955	,932	,565	,358	

Correlação positiva significativa
  Correlação negativa significativa

Anexo F

Gráfico 20 - Diagrama de Gantt do plano de execução experiências do primeiro dia.

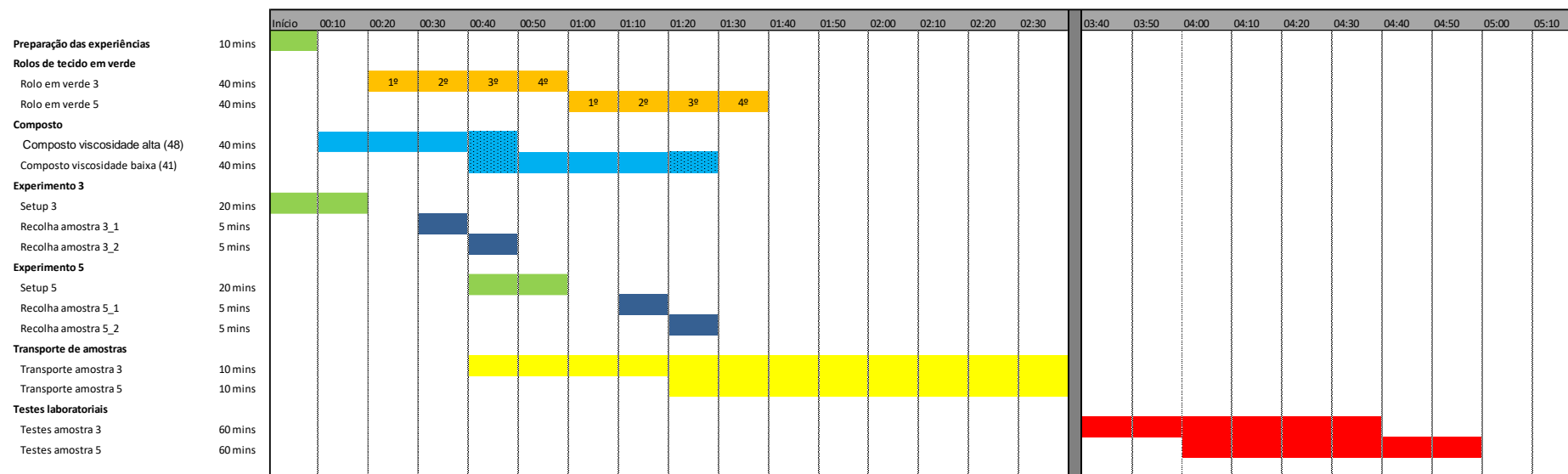


Gráfico 21 - Diagrama de Gantt do plano de execução experiências do segundo dia.

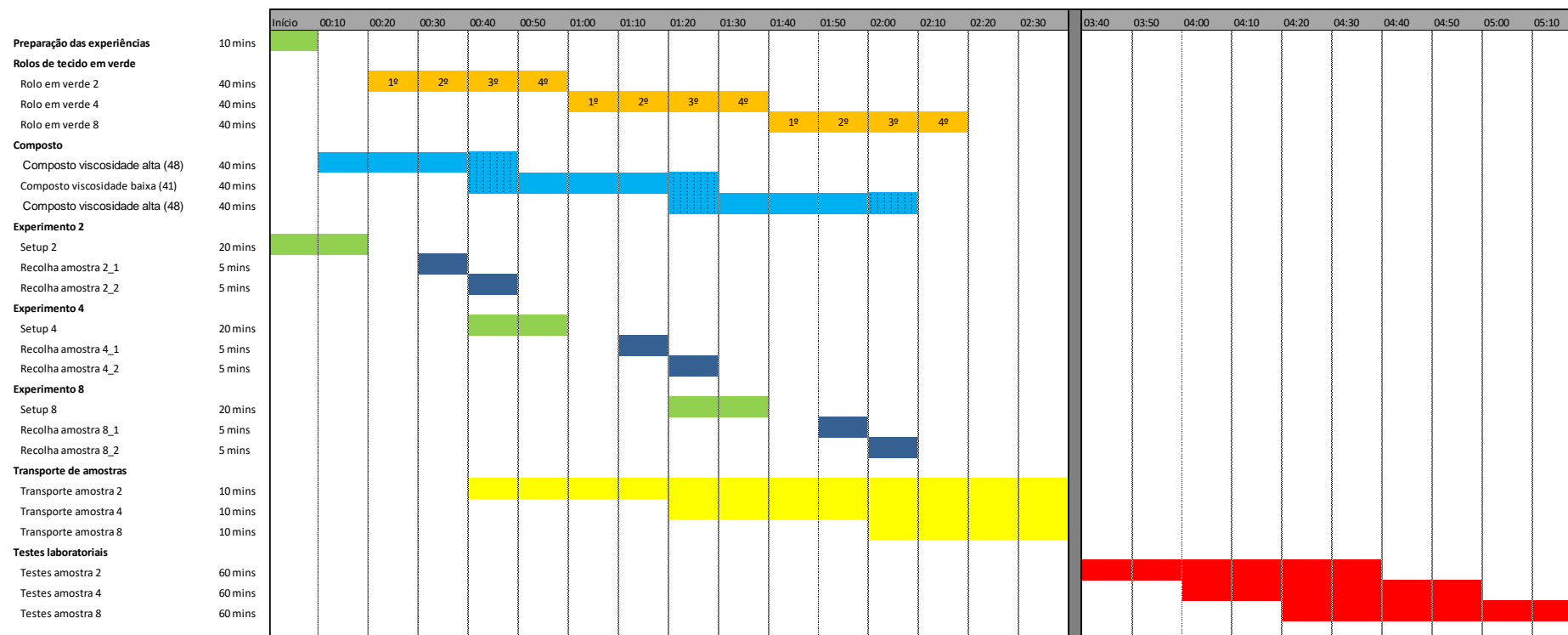
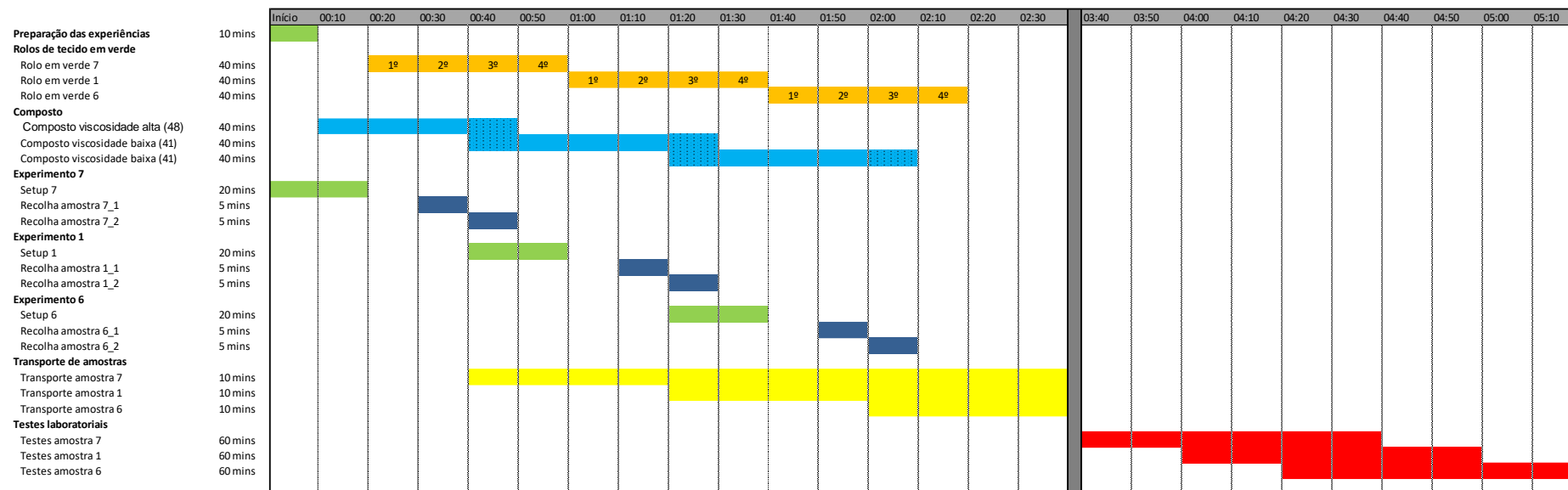


Gráfico 22 – Diagrama de Gantt do plano de execução experiências do terceiro dia.



## Anexo G

Tabela 29 - Resultados das experiências para a propriedade espessura (em mm) e respectivos resultados na razão S/N.

Experiência	Amostra	Lado Operador (esquerdo)				Centro				Lado Motor (direito)				Razão S/N
		M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	
DOE 1	Amostra 1	1,08	1,10	1,09	1,10	1,08	1,11	1,08	1,11	1,09	1,11	1,10	1,11	37,29
	Amostra 2	1,10	1,11	1,10	1,11	1,12	1,10	1,11	1,09	1,10	1,13	1,11	1,13	
DOE 2	Amostra 1	1,12	1,10	1,11	1,10	1,11	1,13	1,11	1,14	1,11	1,12	1,12	1,12	35,01
	Amostra 2	1,13	1,14	1,14	1,14	1,10	1,15	1,11	1,14	1,10	1,09	1,10	1,09	
DOE 3	Amostra 1	1,08	1,05	1,07	1,05	1,08	1,09	1,08	1,09	1,07	1,05	1,07	1,05	29,52
	Amostra 2	1,10	1,13	1,10	1,13	1,12	1,11	1,12	1,11	1,17	1,14	1,13	1,14	
DOE 4	Amostra 1	1,03	1,03	1,02	1,03	1,10	1,07	1,11	1,07	1,10	1,09	1,09	1,09	29,86
	Amostra 2	1,04	1,05	1,04	1,05	1,11	1,09	1,10	1,08	1,11	1,11	1,11	1,12	
DOE 5	Amostra 1	1,07	1,08	1,08	1,08	1,05	1,06	1,06	1,05	1,02	1,05	1,02	1,05	30,79
	Amostra 2	1,02	1,02	1,03	1,02	1,08	1,07	1,09	1,07	1,01	1,00	1,01	1,00	
DOE 6	Amostra 1	1,10	1,12	1,11	1,13	1,15	1,13	1,15	1,16	1,09	1,10	1,09	1,10	33,62
	Amostra 2	1,12	1,13	1,11	1,12	1,13	1,10	1,13	1,09	1,11	1,09	1,10	1,09	
DOE 7	Amostra 1	1,10	1,08	1,08	1,07	1,07	1,07	1,07	1,06	1,06	1,07	1,05	1,07	35,43
	Amostra 2	1,08	1,08	1,08	1,09	1,04	1,07	1,05	1,07	1,03	1,05	1,04	1,05	
DOE 8	Amostra 1	1,11	1,14	1,11	1,14	1,15	1,18	1,16	1,17	1,12	1,11	1,13	1,11	31,55
	Amostra 2	1,13	1,11	1,12	1,11	1,13	1,13	1,13	1,13	1,08	1,08	1,08	1,09	

## Anexo H

Tabela 30 - Resultados das experiências para a propriedade green-adhesion (em N) e respectivos resultados na razão S/N.

Experiência	Amostra	Lado Operador (esquerdo)					Centro					Lado Motor (direito)					Razão S/N
		M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5	
DOE 1	Amostra 1	43	40	39	40	38	42	42	41	39	39	38	39	37	37	37	32,23
	Amostra 2	42	45	45	44	43	44	43	43	43	42	42	42	42	41	40	
DOE 2	Amostra 1	45	45	49	44	43	45	43	36	42	46	46	51	52	45	54	32,74
	Amostra 2	42	38	41	39	38	42	39	41	43	41	48	48	45	48	40	
DOE 3	Amostra 1	40	45	43	43	43	46	47	43	42	45	39	43	44	40	43	32,80
	Amostra 2	47	45	43	44	40	45	44	45	46	42	41	44	49	40	46	
DOE 4	Amostra 1	44	41	45	41	35	42	45	44	39	48	36	43	44	46	43	32,41
	Amostra 2	35	32	39	43	40	45	42	45	45	45	42	45	44	46	45	
DOE 5	Amostra 1	43	48	40	39	37	42	45	47	47	38	46	42	42	48	50	32,67
	Amostra 2	45	44	47	43	41	43	42	45	44	38	46	41	37	47	46	
DOE 6	Amostra 1	45	44	44	43	44	43	43	44	44	45	43	44	42	42	42	32,77
	Amostra 2	45	44	43	43	43	44	46	45	45	44	43	42	43	42	42	
DOE 7	Amostra 1	43	42	41	40	40	41	43	40	39	37	35	36	39	34	38	32,01
	Amostra 2	40	41	39	42	42	42	40	40	40	40	41	42	41	42	42	
DOE 8	Amostra 1	43	41	42	43	40	48	46	45	42	42	47	36	43	43	42	32,86
	Amostra 2	45	45	44	41	41	42	48	48	45	45	48	48	48	49	48	

## Anexo I

Tabela 31 - Resultados das experiências para a propriedade adesividade (em N) e respectivos resultados na razão S/N.

Experiência	Amostra	Lado Operador (esquerdo)					Centro					Lado Motor (direito)					Razão S/N
		M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5	M1	M2	M3	M4	M5	
DOE 1	Amostra 1	41,47	37,12	41,08	34,88	37,74	37,13	30,43	32,87	34,53	29,93	40,74	41,11	31,03	39,48	34,12	-31,09
	Amostra 2	32,01	32,16	40,64	28,73	33,62	34,63	40,46	35,73	37,53	28,23	33,12	40,15	30,32	36,65	40,91	
DOE 2	Amostra 1	31,98	26,76	37,55	27,36	26,35	37,41	25,88	36,12	38,48	22,39	32,33	35,74	30,33	30,31	36,85	-29,76
	Amostra 2	36,31	28,73	29,58	30,81	29,31	21,78	32,99	26,9	18,7	22,85	28,4	34,39	27,54	26,84	38,25	
DOE 3	Amostra 1	27,88	33,78	30,92	34,75	35,87	30,5	36,02	36,14	29,51	33,68	36,14	28,5	35,68	36,34	29,26	-30,31
	Amostra 2	29,1	35,24	36,51	30	29,15	28,2	27,66	27,25	28,24	37,43	35,3	37,12	27,38	36,28	37,43	
DOE 4	Amostra 1	36,57	35,75	29,22	38,38	37,77	33,44	32,46	30,89	34,45	29,43	31,41	29,78	24,5	27,43	22,52	-29,61
	Amostra 2	26,95	33,75	32,97	37,02	37,01	21,88	28,19	23,33	17,4	19,4	29,48	25,55	33,58	26,37	24,18	
DOE 5	Amostra 1	37,94	28,7	30,38	30,13	35,99	26,99	27,43	36,4	29,4	32,08	29,57	35,5	31,87	35,6	(erro)	-30,19
	Amostra 2	36,11	31,14	30,32	36,81	36,51	32,45	25,59	26,65	31,95	34,85	36,18	36,4	24,4	32,32	31,83	
DOE 6	Amostra 1	38,97	33,38	39,55	39,31	40,71	31,52	41,06	27,48	26,4	30,79	30,29	38,49	32,32	37,53	41,3	-31,02
	Amostra 2	38,53	32,67	29,59	39,56	40,73	35,34	38,89	41,1	39,85	33,93	30,76	28,31	36,74	33,1	29,64	
DOE 7	Amostra 1	36,35	35,99	30,42	29,47	27,59	24,75	32,33	40	33,92	35,39	22,93	23,62	35,02	20,64	33,47	-30,22
	Amostra 2	26,94	32,25	27,71	25,06	35,57	35,97	32,36	39,62	37,21	26,85	41,52	36,63	23,59	34,13	40,73	
DOE 8	Amostra 1	37,54	29,09	31,78	38,41	35,04	37,59	24,88	35,41	25,24	26,29	33,22	37,16	40,15	29,58	38,44	-30,46
	Amostra 2	36,14	37,8	27,56	31,4	28,32	29,15	35,18	30,23	27,69	30,47	37,61	38,17	34,67	38,02	29,21	

