



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Vitor Manuel Ribeiro da Silva

**Caracterização e Correção de Não
Conformidades no Processo de Extrusão de
Folha**

Novembro 2020



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Vitor Manuel Ribeiro da Silva

**Caracterização e Correção de Não
Conformidades no Processo de Extrusão de
Folha**

Dissertação de Mestrado

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre
em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professora Doutora Olga Carneiro
Arnaldo Branco

Novembro 2020

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Agradecimentos

Gostaria de agradecer às pessoas sem as quais não poderia ter realizado esta dissertação.

Agradeço à Professora Doutora Olga Carneiro pela orientação que me deu ao longo desta dissertação, bem como pela simpatia e disponibilidade que demonstrou em tempos de elevada instabilidade.

Ao meu orientador na empresa, Arnaldo Branco, por toda a disponibilidade que demonstrou me transmitir o conhecimento sobre o funcionamento da empresa e do seu processo produtivo, bem como pela disponibilidade em esclarecer qualquer dúvida ou questão que surgisse.

A todo o pessoal da Intraplás S. A. pela abertura e espírito de acolhimento que para comigo demonstraram. Um agradecimento especial ao José Luís pela boa disposição que sempre demonstrou e pelo bom ambiente que essa disposição gerava, ao Nuno Pacheco pela boa disposição preocupação, mas também pela integração e pela disponibilidade em ajudar sempre que necessário e ao Bruno Sousa por, apesar da quantidade de trabalho, sempre arranjar tempo para me auxiliar nos ensaios que desejei efetuar.

Ao Professor Doutor Fernando Duarte por estar sempre disponível para esclarecer dúvidas, apesar de não ser meu orientador.

Ao pessoal do DEP, especialmente para o Sr. Mateus e para o Sr. Manuel por todas as piadas e por toda a ajuda que facultaram no decorrer desta dissertação.

Queria agradecer também aos meus amigos com os quais fiz o curso, vivi bons momentos e de quem levo boas memórias. Destas pessoas, um agradecimento especial ao Rúben, Quitéria e Mafalda por toda a ajuda, apoio, suporte moral e incentivo que me deram.

Um grande obrigado à minha família por me dar a oportunidade de frequentar o ensino superior e por todo o apoio que me deram ao longo dos anos do curso.

Muito obrigado a todos.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Caracterização e Correção de Não Conformidades no Processo de Extrusão de Folha

Resumo

A produção de peças não conformes é uma das principais fontes de desperdício na indústria transformadora de plásticos, sendo esse desperdício exacerbado quando a técnica utilizada é a extrusão ou suas variantes, dada a natureza contínua do processo.

O estudo das não conformidades verificadas na Intraplás S. A. teve como objetivo sistematizar a resposta da empresa às não conformidades mais críticas de folhas extrudidas, permitindo à empresa uma redução do intervalo de tempo entre o aparecimento da não conformidade e a sua correção. Este estudo incidiu na extrusão de folhas constituídas por poliestireno (PS), assim como na de folhas de poli(tereftalato de etileno) (PET), uma vez que, devido às recentes tendências em torno deste polímero, a empresa tem vindo a efetuar a sua inclusão no seu portefólio.

Iniciou-se o estudo das não conformidades pela definição da metodologia de análise a aplicar, seguindo-se a definição das não conformidades a estudar segundo essa mesma metodologia, o que resultou na análise a três não conformidades de PS (ondulação, empeno e flecha) e duas de PET (perda de transparência e risco contínuo na direção de extrusão).

A análise de cada uma das não conformidades compreendeu uma explicação do que é cada uma delas, o porquê de representaram um problema a nível da técnica subsequente, a termoformação, o seu método de medição, as causas possíveis e, por fim, as ações corretivas a serem tomadas, de acordo com a ponderação entre correção mais simples e a causa mais provável. Efetuou-se também uma validação experimental das causas expostas para as não conformidades onde esta análise era passível de ser efetuada, revelando que a orientação molecular é o fator responsável pelas várias não conformidades de PS analisadas. No caso do PET, a validação experimental revelou a rápida cristalização do PET como sendo o principal responsável da perda das propriedades óticas desejadas.

Por último, aplicaram-se as ações corretivas numa realidade industrial onde se procedeu à sua validação prática, dado que os valores das não conformidades reduziram substancialmente quando essas ações foram aplicadas, produzindo resultados satisfatórios para a empresa, bem como para o cliente.

Palavras-chave: Extrusão de folha, não conformidades, embalagem, co-extrusão, PS, PET.

Analysis and Correction of Non-conformities in Sheet Extrusion

Abstract

One of the main sources of waste generation in the transformation of plastics is the production of non-conforming parts, especially when the process used is extrusion, due to its continuous nature.

The objective of the study of the non-conformities that occurred in Intraplás S. A. was to create a systematic response to non-conformities that are critical in the sheet extrusion process, reducing the time between its occurrence and the corrective action. The main focus of this study were polystyrene (PS) sheets, Intraplás' main product, and polyethylene terephthalate (PET) sheets, which the company has been including in its portfolio, as a result of the recent trends in polymer packaging for foodstuff.

The definition of the methodology to be applied to the non-conforming sheets was the first step in this study, followed by the selection of the non-conformities to be studied using the defined methodology. This resulted in the study of three PS non-conformities (waving, warpage and bow-effect) and two PET non-conformities (transparency loss and continuous lines in the machine direction).

The non-conformity analysis involved the description of each of them, why their occurrence represents a problem when those sheets are thermoformed, their possible causes and, lastly, a sequence of corrective actions to be taken. In this sequence a balance between the simplest correction and the most probable cause was achieved, in order to try to reduce the machine downtime. Experimental tests were made to validate the appointed causes, which shown that molecular orientation is the main cause of the non-conformities in PS sheet. In PET sheets, quick and undesirable crystallization was the responsible for the non-conformities analyzed.

Finally, and in order to validate the assumptions in industrial environment, the proposed corrective actions were applied to productions where these non-conformities occurred. This revealed that the corrective actions were successful since the deviation values measured for each non-conformity were much lower (and in the range of the clients specifications), which validates the employed methodology and the corrective actions proposed.

Keywords: Sheet Extrusion, non-conformities, packaging, co-extrusion, PS, PET.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Intraplás S. A.....	1
1.2. Enquadramento De Não Conformidades No Processo De Extrusão	2
1.3. Objetivos	5
1.4. Conteúdo	6
Capítulo 2 - Estado de Arte	8
2.1. Troubleshooting.....	8
2.2. Reologia	10
2.3. Manufatura de Folhas em Material Plástico Na Indústria da Embalagem.....	12
2.3.1. Co-extrusão	13
2.3.2. Fieira.....	17
2.3.3. Calandra	19
2.3.4. Rolos de Puxo.....	22
2.3.5. Bobinador	22
Capítulo 3 - Matérias-Primas	24
3.1. Poliestireno	24
3.1.1. General-purpose Polystyrene (GPPS).....	24
3.1.2. High-Impact Polystyrene (HIPS)	25
3.1.3. Mistura GPPS/HIPS	27
3.2. Poli(tereftalato de Etileno)	28
3.3. GPPS/HIPS VS PET	31
3.3.1. Extrusão	31
3.3.2. Termoformação	32
3.3.3. Produto Final	33
3.3.4. Reciclagem	34
Capítulo 4 - Metodologia e Técnicas de Caracterização.....	37
4.1. Metodologia de Análise	37
4.2. Técnicas de Caracterização	40
4.2.1. Medição da Birrefringência (Compensador de Berek)	40
4.2.2. Medição da Contração	41
4.2.3. Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC).....	41
4.2.4. Medição da Transmitância Luminosa (Turbidez)	42
Capítulo 5 - Análise das Não Conformidades	43

5.1.	Não conformidades relativas à mistura GPPS/HIPS	43
5.1.1.	Ondulações.....	44
5.1.1.1.	Medição.....	48
5.1.1.2.	Causas	49
5.1.1.3.	Ações Corretivas	53
5.1.1.4.	Validação Experimental	53
5.1.2.	Empeno.....	60
5.1.2.1.	Medição.....	61
5.1.2.2.	Causas	62
5.1.2.3.	Ações Corretivas	62
5.1.2.4.	Validação Experimental	63
5.1.3.	Flecha	65
5.1.3.1.	Medição.....	65
5.1.3.2.	Causas	66
5.1.3.3.	Ações Corretivas	69
5.1.3.4.	Validação Experimental	70
5.2.	Não Conformidades Relativas ao PET.....	76
5.2.1.	Perda de Transparência	76
5.2.1.1.	Causas	78
5.2.1.2.	Ações Corretivas	80
5.2.1.3.	Validação Experimental	80
5.2.2.	Risco Contínuo na Direção de Extrusão.....	83
5.2.2.1.	Causas	84
5.2.2.2.	Ações Corretivas	85
Capítulo 6 -	Casos de Estudo	87
6.1.	Caso de Estudo 1	87
6.2.	Caso de Estudo 2	91
6.3.	Caso de Estudo 3	96
6.4.	Caso de Estudo 4	98
Capítulo 7 -	Conclusão e Sugestão de Trabalhos Futuros.....	102
Referências	Bibliográficas	104
Anexos		114

Lista de abreviaturas e siglas

8D	8 disciplinas para resolução de problemas
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
APCER	Associação Portuguesa de Certificação
aPET	Poli(tereftalato de etileno) amorfo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BRC	<i>British Retail Consortium</i>
C	Contração
CPET	Poli(tereftalato de etileno) cristalino
DOE	Planeamento de experiências, do inglês, <i>Design of Experiments</i>
DSC	Calorimetria Diferencial de Varrimento, do inglês, <i>Differential Scanning Calorimetry</i>
<i>E</i>	Módulo de <i>Young</i>
EPS	Poliestireno expandido, do inglês, <i>expanded polystyrene</i>
FDA	<i>Food and Drug Administration</i>
GPPS	Poliestireno cristal, do inglês, <i>general-purpose polystyrene</i>
HDPE	Polietileno de alta densidade, do inglês, <i>high-density polyethylene</i>
HIPS	Poliestireno de alto impacto, do inglês, <i>high-impact polystyrene</i>
HVTSE	Sistema de alto vácuo, do inglês, <i>High Vacuum Twin Screw Extrusion</i>
IARC	Agência Internacional de Pesquisa sobre o Cancro, do inglês, <i>International Agency for Research on Cancer</i>
ISO	Organização Internacional de Normalização, do inglês, <i>International Standardization Organization</i>
L	Dimensão após a realização da técnica exposta
L_0	Dimensão inicial da amostra
LDPE	Polietileno de baixa densidade, do inglês, <i>low-density polyethylene</i>
LIE	Limite Inferior de Especificação
LLDPE	Polietileno linear de baixa densidade, do inglês, <i>linear low-density polyethylene</i>
LSE	Limite Superior de Especificação
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
PA6	Poliamida 6
PC	Polycarbonato
PE	Polietileno
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PLA	Ácido Poliláctico, do inglês, <i>polylactic acid</i>
PP	Polipropileno

PS	Poliestireno
PVC	Poli(cloreto de vinilo), do inglês, <i>Polyvinyl chloride</i>
RCA	Análise da causa raiz, do inglês, <i>Root Cause Analysis</i>
R_I	Resistência ao Impacto
T_D	Transmitância luminosa difusa
T_g	Temperatura de transição vítrea
T_T	Transmitância luminosa total
$\Delta H_{fus,c}$	Entalpia de fusão do cristal perfeito
ΔH_{fus}	Entalpia de fusão
ϵ	Deformação
η	Viscosidade
σ	Tensão
$X_{c,h}$	Grau de cristalinidade

Índice de Figuras

Figura 1 - Produção global de matéria-prima e respetivas aplicações em 2018 [14].	2
Figura 2 - Comparação dos custos de um bom e um mau sistema de gestão da qualidade.	4
Figura 3 - Representação de não conformidades onde em (a) se ilustra o inchamento excessivo à saída da fiação e em (b) se demonstram extrudidos onde ocorreu fratura do fundido. Adaptado [4, 23].	4
Figura 4 - Procedimento habitual de resolução de não conformidades.	9
Figura 5 - Influência da distribuição da massa molecular na viscosidade para várias taxas de corte. Adaptado de [41].	10
Figura 6 - Curvas de fluxo da poliamida 6 (PA6), policarbonato (PC) e acrílonitrilo butadieno estireno (ABS) [4].	11
Figura 7 - Representação esquemática do equipamento auxiliar típico de uma linha de extrusão de folha. Adaptado de [47].	12
Figura 8 - Ilustração de uma possível estrutura multicamada (quatro camadas).	13
Figura 9 - Funcionamento de um bloco de distribuição. Adaptada de [56].	14
Figura 10 - Funcionamento de uma fiação com múltiplas zonas de distribuição. Adaptada de [56].	15
Figura 11 - Fiação com distribuidor do tipo cabide e as suas zonas [56].	18
Figura 12 - Demonstração da colocação dos calços, bem como o respetivo fluxo, onde em (a) se encontram os calços internos e em (b) os calços externos. Adaptada de [66–68].	19
Figura 13 - Representação dos fenómenos neck-in e dog bone. Adaptada de [72].	20
Figura 14 - Acumulação de material conhecida como linha de compensação. Adaptada de [47].	20
Figura 15 - Sistema de bobinagem central (a) e por contacto (b) utilizados numa linha de extrusão de folha. Adaptada de [47].	23
Figura 16 - Fórmula genérica da unidade repetitiva do poliestireno [81].	24
Figura 17 - Mecanismo de formação de HIPS, no qual R· representa um radical livre. Adaptada de [87].	25
Figura 18 - Comparação do comportamento do GPPS e do HIPS quando expostos a impacto [80].	26
Figura 19 - Comparação das curvas tensão-deformação do GPPS e do HIPS. Retirado de [90].	27
Figura 20 - Fórmula genérica da unidade repetitiva do PET [96].	28
Figura 21 - Efeito da humidade nas propriedades mecânicas do PET [61].	30
Figura 22 - Efeito do número de ciclos na viscosidade Newtoniana para PET seco e PET húmido em (a) e no grau de cristalinidade em (b). Adaptada de [125].	36
Figura 23 - Efeito do número de ciclos no módulo de elasticidade, E, e na resistência ao impacto, RI. Adaptada de [125].	36
Figura 24 - Efeito do número de ciclos na tensão de rotura, σ , e na deformação de rotura, ϵ . Adaptada de [125].	36
Figura 25 - Metodologia aplicada na resolução das não conformidades mais críticas.	39
Figura 26 - Funcionamento de um compensador de Berek, onde a azul está representado o raio ordinário e a vermelho extraordinário. Adaptada de [128].	40
Figura 27 - Exemplo de uma amostra utilizada no teste de contração.	41
Figura 28 - Zonas onde se efetuou a análise da transmitância luminosa das folhas.	42
Figura 29 - Diagrama de Pareto da análise efetuada às reclamações.	43
Figura 30 - Representação 3D duma folha com ondulação lateral.	44

Figura 31 - Representação da elevação do material na termoformadora causada pela ondulação da folha.	45
Figura 32 - Aquecedores alveolares utilizados nas máquinas de form-fill-seal.	45
Figura 33 - Resultado da deslocação da zona aquecida na termoformação.	46
Figura 34 - Problemas causados pela ondulação na fase de aquecimento da termoformação.	47
Figura 35 - Variação da força aplicada consoante o comprimento de folha bobinada.	48
Figura 36 - Representação da contagem de ondulações presentes na amostra	49
Figura 37 - Exemplificação da altura mais acentuada na medição de ondulações.	49
Figura 38 - Arranque de máquina.	50
Figura 39 - Diagrama de Ishikawa referente à não conformidade em questão.	50
Figura 40 - Representação do efeito de uma temperatura do fundido não uniforme, onde em (a) ocorre a solidificação das extremidades e em (b) a solidificação do centro.	51
Figura 41 - Representação da criação de ondulação pela lâmina de corte.	52
Figura 42 - Temperatura das extremidades da folha à saída da fiação.	54
Figura 43 - Temperatura do centro da folha à saída da fiação.	54
Figura 44 - Temperatura das extremidades da folha na fase de arrefecimento.	55
Figura 45 - Temperatura do centro da folha na fase de arrefecimento.	55
Figura 46 - Corte lateral da folha da mistura de GPPS/HIPS observado ao microscópio com uma ampliação de 10 na objetiva e 1.67 na câmara do mesmo.	56
Figura 47 - Pormenor das microfissuras da mistura de GPPS/HIPS observado ao microscópio com uma ampliação de 20 na objetiva e 1.67 na câmara do mesmo: (a) centro da folha; (b) extremidade.	57
Figura 48 - Explicação das 3 zonas consideradas e as amostras retiradas das respetivas zonas onde em (a) se trata da folha de controlo e em (b) a folha com ondulação.	58
Figura 49 - Valores obtidos no teste da contração para a direção longitudinal das amostras de controlo e de material com ondulação.	58
Figura 50 - Valores obtidos no teste da contração para a direção transversal das amostras de controlo e de material com ondulação.	59
Figura 51 - Representação 3D duma folha com empeno vista de frente.	60
Figura 52 - Tensões residuais ao longo da espessura de uma folha. Adaptado de [136].	60
Figura 53 - Representação das diferentes distâncias que uma folha com empeno apresenta ao aquecedor em (a) e seu resultado em (b).	61
Figura 54 - Método de medição do empeno.	61
Figura 55 - Microscopia de luz polarizada de amostras retiradas duma folha da mistura de GPPS/HIPS com empeno. Ampliação de 10 na objetiva e 1.67 na câmara do microscópio.	64
Figura 56 - Microfissuras resultantes do corte da mistura GPPS/HIPS a uma ampliação de 20, onde em (a) se utiliza microscopia de luz polarizada e em (b) microscopia de campo claro.	64
Figura 57 - Representação do gradiente de orientação na direção transversal de extrusão. Adaptada de [137].	65
Figura 58 - Representação 2D (vista de cima) do método de medição da flecha, onde x é a medida a determinar.	66
Figura 59 - Diagrama de Ishikawa referente à não conformidade em questão.	67
Figura 60 - Representação de desalinhamentos na linha, potenciando o aparecimento de flechas. Adaptada de [138].	68

Figura 61 - Representação do percurso da água numa calandra. O aquecimento da água encontra-se representado pela transição do azul (temperatura menor) para o vermelho (temperatura maior). Adaptada de [140].	68
Figura 62 - Efeito dum gradiente transversal de temperatura, onde em (a) encontra-se exposta uma folha com diferentes temperaturas e em (b) se apresenta a folha após o arrefecimento.	69
Figura 63 - Alinhamento da folha com o laser de guiamento.	70
Figura 64 - Temperatura da folha à saída da fieira, onde em (a) se encontra a extremidade esquerda e em (b) a extremidade direita, considerando a direção de extrusão.	71
Figura 65 - Temperatura após o arrefecimento, onde em (a) se encontra a extremidade esquerda e em (b) a extremidade direita, considerando a direção de extrusão.	71
Figura 66 - Representação das zonas onde se procedeu às medições da temperatura apresentadas na Figura 64 e na Figura 65.	72
Figura 67 - Corte lateral da folha da mistura de GPPS/HIPS observado ao microscópio com uma ampliação de 10 na objetiva e 1.67 na câmara do mesmo.	72
Figura 68 - Pormenor das microfissuras da mistura de GPPS/HIPS observado ao microscópio com uma ampliação de 20 na objetiva e 1.67 na câmara do mesmo, onde em (a) se trata da extremidade estirada e em (b) se trata da extremidade contraída.	73
Figura 69 - Amostras de material com flecha após o teste de contração.	74
Figura 70 - Valores obtidos no teste da contração para a direção longitudinal das amostras de controlo e de material com flecha.	74
Figura 71 - Valores obtidos no teste da contração para a direção transversal das amostras de controlo e de material com flecha.	75
Figura 72 - Decomposição da luz incidente ao entrar em contacto com uma superfície. Adaptada de [141].	76
Figura 73 - Difusão da luz por uma partícula, onde θ representa o ângulo de difusão.	77
Figura 74 - Reflexão superficial difusa de um feixe luminoso.	77
Figura 75 - Diagrama causa-efeito referente à não conformidade "Perda de Transparência".	78
Figura 76 - Valores da transmitância luminosa obtida com as várias temperaturas dos cilindros da calandra.	81
Figura 77 - Influência da percentagem de antiblock na transmitância.	83
Figura 80 - Risco longitudinal presente na superfície da folha.	84
Figura 79 - Representação da acumulação de material nos lábios da fieira. Adaptada de [28].	85
Figura 80 - Anéis de guiamento utilizados para corrigir a flecha em (a), em (b) o seu posicionamento em relação ao rolo de cartão e em (c) a bobinagem com recurso a estes anéis.	88
Figura 81 - Condições de processamento utilizadas em busca do solucionamento do empeno no caso de estudo 1.	90
Figura 82 - Desalinhamento das espiras devido a diferenciais de tensão.	92
Figura 83 - Comparação entre a zona de devolução (a) e fim de bobine (b).	93
Figura 84 - Representação das temperaturas utilizadas nas duas produções de teste.	95
Figura 85 - Influência da temperatura de aquecimento na transmitância das amostras.	97
Figura 86 - Influência da percentagem de antiblock na transmitância das amostras aquecidas a 75°C.	98
Figura 87 - Risco ocorrido na produção de PET translúcido.	98

Figura 88 - Folha de PET onde em (a) é possível visualizar o risco e o início do efeito espinhado e em (b) se visualiza este mesmo efeito totalmente desenvolvido.	99
Figura 89 - Configuração do bloco distribuidor e representação dos caminhos dos diferentes materiais e da "zona morta"	100
Figura 90 - Fieira danificada responsável pelo risco observado na folha de PET.	101

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Comparação entre bloco distribuidor e feira com múltiplas zonas de distribuição. Adaptada de [35, 45, 56].....	15
Tabela 2 - Valores relativos às propriedades mecânicas do GPPS [4, 83].	25
Tabela 3 - Valores das propriedades mecânicas do HIPS [83].	26
Tabela 4 - Valores das propriedades mecânicas do PET [4, 83].	29
Tabela 5 - Polímeros utilizados nos Estados Unidos em 2012 e respectivas quantidades [123].	35
Tabela 6 - Exemplificação duma tomada de decisão relativa à medição da ondulação lateral.	49
Tabela 7 - Exemplificação duma tomada de decisão relativa à medição do empeno	62
Tabela 8 - Parâmetros relevantes e valores obtidos numa medição de flecha.	66
Tabela 9 - Temperaturas utilizadas para os cilindros da calandra na obtenção das várias amostras de PET.	81
Tabela 10 - Valores obtidos no DSC para a entalpia de fusão e grau de cristalinidade.	82
Tabela 11 - Medição efetuada às bobines reclamadas.	87
Tabela 12 - Comparação das não conformidades em estudo antes e depois da medida preventiva. ...	89
Tabela 13 - Valores das não conformidades em análise numa produção normal e com as novas condições de processamento.	90
Tabela 14 - Sumário da análise da proveniência das bobines.	92
Tabela 15 - Sumário das medições efetuadas aos cabeços.....	93
Tabela 16 - Valores das não conformidades em bobines decorrentes duma produção normal e com as novas condições de processamento.	95

1.1. INTRAPLÁS S. A.

A Intraplás S. A. é uma empresa pertencente à indústria transformadora de plásticos, fundada a 17 de outubro de 1968 pelo Comendador António Machado Ferreira, iniciando a sua atividade com a produção de máscaras de carnaval. No ano de 1974 a empresa adquiriu a sua primeira linha de extrusão, mudando o seu principal produto para folhas termoplásticas [1]. Atualmente, a gama de produtos da Intraplás continua a ter por base a produção de folhas e embalagens plásticas para a indústria alimentar, porém encontra-se também inserida na área de impressão, muitas vezes dos próprios produtos. Posteriormente, no ano de 1987, a empresa alterou o seu estatuto jurídico para sociedade anónima.

De modo a manter a posição de topo no mercado, a Intraplás procedeu ao investimento sucessivo, acompanhando os avanços tecnológicos na sua área de atividade. Como tal, implementou também um sistema de gestão de qualidade em 1993, inicialmente sob a norma ISO 9002 até junho de 2003, transitando posteriormente para a ISO 9001:2000 e versões conseguintes. Em fevereiro de 2003 certificou-se na marcação CE, aplicável a instrumentos de medição, pela APCER. Integra desde 2013 a lista de fornecedores FDA (*Food and Drug Administration*) na área da folha para produtos lácteos, obtendo no mesmo ano a certificação BRC *Global Standard for Packaging & Packaging Materials* pela ISACERT/APCER [2].

De forma a aumentar a capacidade produtiva para responder às necessidades, construiu-se de raiz uma segunda unidade localizada em Lordelo, que iniciou a sua laboração em 2014. Estas segundas instalações encarregam-se maioritariamente dos processos de termoformação e impressão, para além da função de armazenamento. Em 2017 a empresa certificou a unidade de Termoformados/Impressos (por *offset* a seco), assim como havia feito em 2013 para a folha extrudida, pela ISACERT/APCER [2].

A missão definida pela Intraplás é “Ser uma das empresas líderes no mercado do laminado e embalagens termoplásticas para a indústria alimentar, apoiados numa gama de produtos seguros, inovadores e de qualidade, com vista a assegurar um crescimento sustentado a longo prazo.” [3].

Já a sua visão passa por “Ser ator de relevante influência no mercado internacional e nacional, promovendo uma performance de qualidade e serviço global, baseado no desenvolvimento e inovação de produtos diferenciados.” [3].

1.2. ENQUADRAMENTO DE NÃO CONFORMIDADES NO PROCESSO DE EXTRUSÃO

Os plásticos ganharam espaço no mercado, relativamente a materiais tradicionais como metais e o vidro, devido à sua baixa densidade, flexibilidade e facilidade de moldação. Estas propriedades são conferidas aos produtos confeccionados a partir destes materiais, fator de elevada importância em muitas áreas de aplicação como a indústria da embalagem, que em 2018 representou cerca de 39.9% dos plásticos produzidos na Europa, como comprovado pela Figura 1 [4].

A indústria da embalagem, que engloba todas as áreas que requerem o acondicionamento do produto, assume uma grande importância na indústria alimentar, dado que esta deve possuir boa resistência química e mecânica, mas principalmente boas propriedades de barreira. Estes requisitos têm como objetivo aumentar o tempo de prateleira do produto, de forma a prevenir a sua degradação, assegurando assim a sua qualidade ao consumidor final e uma diminuição do desperdício [5–12]. Como tal, as matérias-primas de eleição para estas embalagens são o poliestireno (PS), polipropileno (PP), poli(tereftalato de etileno) (PET) e polietileno (PE), como demonstrado na Figura 1, uma vez que asseguram as propriedades supramencionadas, em conjunto com uma elevada disponibilidade e preço reduzido [8, 10, 13].



Figura 1 - Produção global de matéria-prima e respetivas aplicações em 2018 [14].

Contudo, o mercado da embalagem alimentar é extremamente competitivo o que leva a um desenvolvimento contínuo de novos produtos e novas soluções. Estas novas soluções representam duas oportunidades em simultâneo, sendo elas a diferenciação da concorrência e a redução do desperdício alimentar. Este conjunto de fatores aliado a fatores económicos têm vindo a aumentar a exigência dos clientes em relação aos produtos [7, 15]. O cumprimento dessa exigência requer um maior controlo da qualidade do produto, devendo verificar se o mesmo se encontra de acordo com as especificações, sendo que uma falha no cumprimento destas especificações constitui uma não conformidade e não um defeito, como erroneamente denominado no quotidiano.

Posto isto, é importante efetuar a distinção entre não conformidade e defeito, dado que apesar de comumente utilizados como sinónimos, possuem conotações legais distintas. O termo “não conformidade” significa que o produto em causa não cumpre com as especificações do cliente ou os limites do processo [16–19]. Defeito relaciona a existência de não conformidades com a utilização pretendida ou especificada pelo cliente, existindo defeito apenas quando uma não conformidade compromete essa utilização. Considerem-se duas peças plásticas do interior de um automóvel, ambas com mau acabamento superficial, sendo que apenas uma das peças é visível pelo condutor dado que a outra é estrutural. Neste caso, a peça estrutural com mau acabamento apenas representa uma não conformidade, dado que a sua utilização não requer um bom acabamento. No entanto, a peça visível ao condutor representa um defeito, dado que um bom acabamento superficial se enquadra na utilização pretendida pelo cliente.

É de notar que a utilização pretendida também é afetada pela informação que o cliente recebe do fabricante sobre o modo de funcionamento ou manutenção do equipamento [19].

Como supramencionado, a qualidade do produto de uma empresa é extremamente importante, dada a elevada competitividade do mercado atual [20]. Deste modo, o departamento da qualidade deve verificar no arranque e várias vezes ao longo da produção se o produto se encontra de acordo com o requerido pelo cliente. Este controlo, no qual se encontram inseridas as não conformidades, representam um custo entre os 5% e 25% das vendas das empresas que se inserem na indústria transformadora de plástico, sendo que a extremidade mais elevada do intervalo mencionado (20 a 25%) se encontra associada a uma má gestão da qualidade. Nestes casos, não conformidades presentes no produto representam cerca de 70% dos custos [21]. Estes valores encontram-se explicitados na Figura 2.

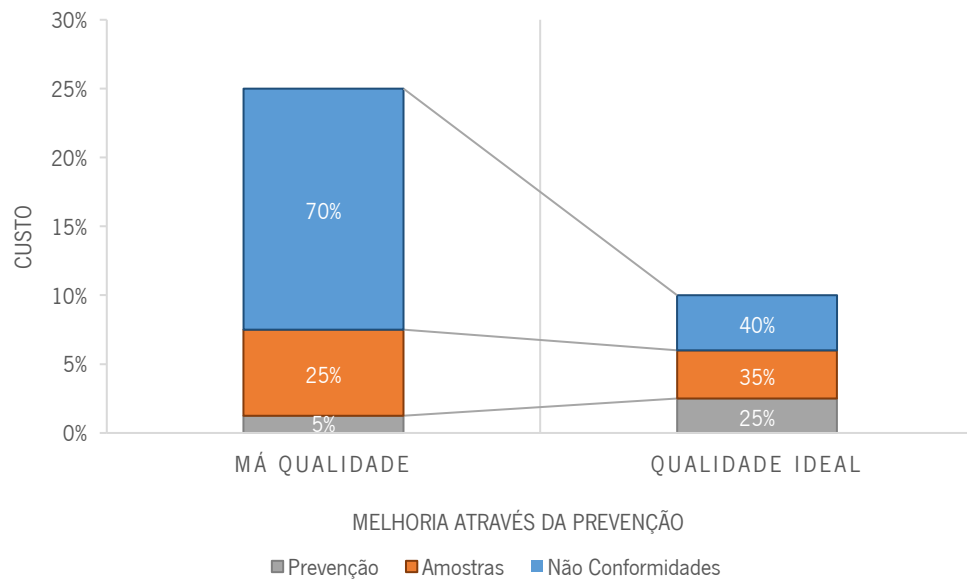


Figura 2 - Comparação dos custos de um bom e um mau sistema de gestão da qualidade.

No caso da extrusão, estas não conformidades podem variar desde elementares, como o inchamento excessivo, ou seja, o aumento das dimensões do extrudido resultante da elasticidade dos materiais, ilustrado na Figura 3 (a), e fratura de fundido, que se caracteriza por uma deformação estrutural na aparência do fundido, podendo assumir várias formas, como demonstrado na Figura 3 (b), cuja formação se deve ao perfil de velocidades desenvolvido no escoamento e reologia do fundido, até casos mais complexos. Contudo, independentemente da complexidade da causa, todas as não conformidades representam desperdício, sendo esse desperdício exacerbado quando a técnica utilizada é a extrusão ou suas variantes, dada a natureza contínua do processo que, por sua vez, se reflete como um custo para a empresa [22].

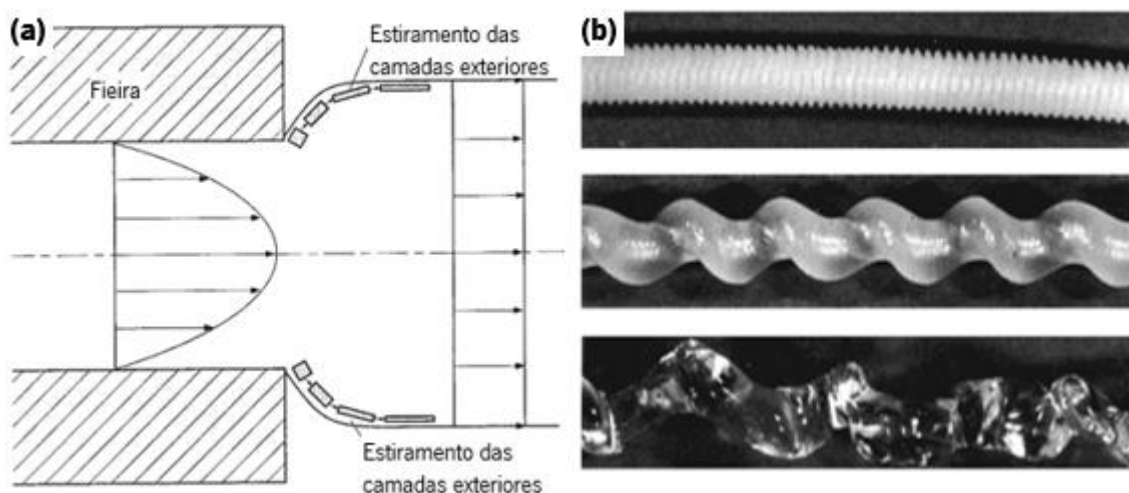


Figura 3 - Representação de não conformidades onde em (a) se ilustra o inchamento à saída da fiação e respetiva causa e em (b) se demonstram extrudidos onde ocorreu fratura do fundido. Adaptado [4, 23].

Quando a extrusão é utilizada como um processo intermédio entre matéria-prima e termoformação, a manufatura de folhas não conformes é extremamente prejudicial, visto que de modo a obter consistentemente peças termoformadas de alta qualidade, sem necessidade de alterar as condições de processamento, também as folhas necessitam de ser consistentemente de elevada qualidade [24–26]. Este requisito deve-se ao facto de a folha manter o historial da extrusão e não conformidades ocorridas nesse processo serem exacerbadas no momento da termoformação, em consequência da deformação a que a folha, previamente aquecida, está sujeita nesse processo.

De modo a prevenir a ocorrência de não conformidades, garantindo assim a qualidade requerida à folha, é necessário testar a matéria-prima internamente e controlar a produção da bobine de folha, reduzindo o número de imprevistos na produção e facilitando a manufatura duma folha dentro das especificações do cliente. O controlo do processo, combinado com o controlo do produto, permite efetuar estas atividades que, em conjunto com outras ferramentas de qualidade, possibilitam verificar se as especificações do cliente foram de facto cumpridas e minimizar o tempo em que se produz folhas com qualidade inferior à aceitável e, como resultado, reduzir os custos com desperdício [27, 28].

A abordagem proactiva é a melhor forma de combater as não conformidades, como demonstrado anteriormente na Figura 2. No entanto, imprevistos que originam não conformidades podem ocorrer devido a oscilações das características da matéria-prima, assim como oscilações naturais do processo, sendo necessário um estudo do problema evidenciado, efetuando uma abordagem reativa [20]. Nestes casos, a identificação da causa da não conformidade é crucial, sendo que para tal se recorre a um processo denominado de *troubleshooting*, no qual é comum recorrer a metodologias de análise de problemas, tais como 8D, DOE, RCA, 5 porquês, entre outras, ou idealizar uma metodologia que seja mais apropriada ao método de trabalho da empresa.

1.3. OBJETIVOS

O intuito desta dissertação é sistematizar a resposta da Intraplás S. A. às não conformidades mais críticas de folhas extrudidas, sendo para esta finalidade imperativo identificar a sua origem, procedendo posteriormente à sua resolução. Isto permitirá à empresa uma redução do intervalo de tempo entre o aparecimento da não conformidade e a sua correção, reduzindo a quantidade de bobines produzidas em incumprimento das especificações do cliente. Este conjunto de benefícios, em última

análise, resultará numa redução dos custos de produção da empresa e numa maior eficiência, com consequente redução do impacto ambiental.

Este estudo incidirá na principal atividade/produto da empresa, ou seja, na extrusão de folhas constituídas por PS, assim como na de folhas de PET, uma vez que, devido às recentes tendências em torno deste polímero, a empresa tem vindo a efetuar a sua inclusão no seu portefólio. O estudo englobará as seguintes etapas:

- Definição da metodologia de análise das não conformidades.
- Identificação das não conformidades críticas resultantes do processo de extrusão folhas de PS.
 - Recolha de dados relativos a não conformidades referentes a folhas de PET.
 - Aplicação da metodologia definida.
 - Identificação da causa de cada não conformidade crítica.
 - Validação experimental da ação corretiva referente à causa identificada.
 - Esquematização.
 - Validação prática das ações corretivas através de casos de estudo.

1.4. CONTEÚDO

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos.

No capítulo 1, *Introdução*, apresenta-se a empresa na qual se efetuou a dissertação e efetua-se um enquadramento das não conformidades e do seu estudo. Neste capítulo são também explicitados os objetivos do trabalho.

No capítulo 2, *Estado da Arte*, apresentam-se os fundamentos teóricos resultantes da revisão literária, baseada no processo de *troubleshooting*, propriedades reológicas dos polímeros, bem como na técnica de processamento, nomeadamente, a co-extrusão.

No capítulo 3, *Matérias-Primas*, encontra-se uma explicitação das matérias-primas nas quais se baseia este estudo, ou seja, o PS e o PET, incluindo as suas propriedades relevantes para o processamento e aplicação e efetuando uma comparação direta entre os dois materiais.

No capítulo 4, *Metodologia e Técnicas de Caracterização*, apresenta-se a metodologia utilizada na análise das não conformidades, explicitando os passos seguidos, bem como o seu objetivo. Neste capítulo também são apresentadas as técnicas de caracterização aplicadas às não conformidades e os respetivos métodos de preparação das amostras.

No capítulo 5, *Análise das Não Conformidades*, aplicou-se a metodologia definida no capítulo 4 para proceder à definição das não conformidades a estudar e, posteriormente, efetuar a sua análise. Esta análise compreende a origem do problema, o método de medição utilizado, as causas mais comuns e respetivas ações corretivas. Este capítulo contém ainda a validação experimental das causas apontadas, através das técnicas de caracterização apresentadas no capítulo 4.

O capítulo 6, *Casos de Estudo*, como o nome indica, contém casos de estudo que possuem as não conformidades estudadas no capítulo 5, sendo estes usados como meio de comprovação da industrialização das ações corretivas propostas.

No capítulo 7, *Conclusões e Sugestão de Trabalhos Futuros*, expõem-se as principais conclusões da dissertação. Explicitam-se também sugestões para uma continuação deste estudo no futuro.

No processo de extrusão de plásticos a manufatura de produtos não conformes é extremamente prejudicial, dada a natureza contínua do processo e os elevados débitos envolvidos, como supramencionado. Estes produtos não conformes, apesar de poderem ser reintroduzidos no sistema através da reciclagem primária, representam desperdício que, por sua vez, se reflete como um custo para a empresa [22, 29, 30].

O processo de *troubleshooting* tem como objetivo a redução dos custos relativos ao desperdício, através da reposição da produção dentro das especificações do cliente da forma mais célere possível. Isto leva a que este processo seja por vezes considerado o processo mais importante da técnica de extrusão [27–31].

2.1. TROUBLESHOOTING

O *troubleshooting* é um processo que, através da combinação da tecnologia e do conhecimento científico sobre a técnica de processamento utilizada, procura determinar a origem de não conformidades de forma célere e sistemática [20, 30, 31].

Neste processo, consideram-se, de acordo com as informações disponíveis, uma série de hipóteses plausíveis para a origem da não conformidade. Na formulação de hipóteses, ferramentas de qualidade como o diagrama de *Ishikawa*, que se focam em encontrar a raiz do problema, representam uma mais-valia na rápida correção de não conformidades, uma vez que permitem identificar as causas raiz, ou seja, a causa considerada de maior nível, de forma rápida e intuitiva [30, 32, 33]. Posteriormente, as hipóteses consideradas são testadas através da implementação de ações corretivas, de forma a proceder à eliminação ou comprovação das possíveis causas, identificando assim a causa real. [31, 33]. Este procedimento encontra-se ilustrado na Figura 4.

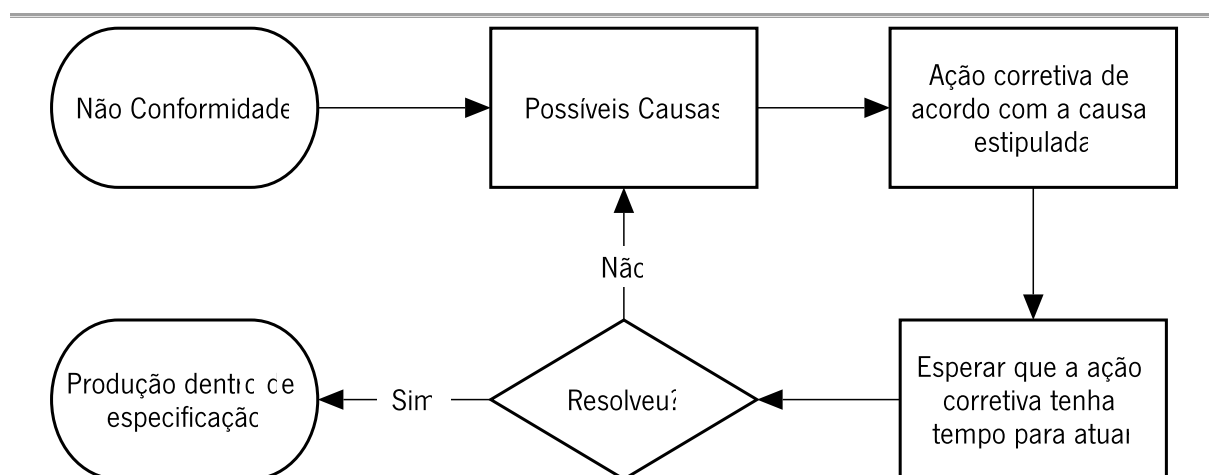


Figura 4 - Procedimento habitual de resolução de não conformidades.

A formulação de possíveis causas deve envolver pessoas de vários departamentos, de forma a integrar diferentes tipos de experiência e conhecimento relativamente ao comportamento do material, a interação entre este e as variáveis operatórias e o modo como estas influenciam o produto. Isto significa que para a formulação de causas plausíveis e, consequentemente, um bom processo de *troubleshooting*, existem dois requisitos fundamentais, a instrumentação da técnica produtiva e o seu conhecimento científico [20, 22, 28, 34, 35].

Uma vez que não é possível visualizar diretamente a transformação da matéria-prima no interior da extrusora, a instrumentação permite, de modo indireto, perceber o que está a decorrer no seu interior através da monitorização da temperatura e pressão da massa fundida. Desta forma, a instrumentação possibilita a recolha de dados que permitem detetar alterações na produção que podem originar a não conformidade, possibilitando uma redução do tempo necessário para efetuar uma decisão informada e reduzir o desperdício. No entanto, todas as informações devem ser verificadas de forma a comprovar a sua veracidade. [27, 29, 36, 37].

As causas raiz de uma não conformidade podem variar desde algo simples como a substituição de um componente, até algo extremamente complexo relacionado com o carácter viscoelástico do material [29]. Posto isto, o conhecimento das estreitas relações entre processo, matéria-prima e reologia, bem como um conhecimento dos equipamentos, respetivas funções que estes desempenham e impacto no produto final, são essenciais para um bom processo de *troubleshooting* [20, 22, 38].

2.2. REOLOGIA

A reologia, ciência que estuda a relação entre tensão, deformação e tempo, fornece informação sobre as propriedades reológicas intrínsecas de cada polímero, sendo que estas propriedades são preponderantes na fase de processamento, uma vez que definem maioritariamente a forma como o polímero se irá deformar e/ou fluir consoante as condições a que é exposto, como, por exemplo, geometria do canal de escoamento, temperatura e débito de processamento [39, 40].

A viscosidade, propriedade reológica que caracteriza a resistência ao escoamento, é dependente de fatores estabelecidos na reação de polimerização, sendo elas a massa molecular média e a polidispersividade, ou seja, a distribuição de massas moleculares [12, 41, 42]. Os polímeros são constituídos por macromoléculas, sendo que a sua massa molecular média e o número de ligações intermoleculares (entrelaçamentos) se encontram diretamente relacionados. Estes entrelaçamentos aumentam as forças de coesão do material, dificultando a orientação das moléculas segundo a direção do escoamento, ou seja, conferem ao polímero uma maior resistência ao escoamento [39, 43].

A viscosidade também se encontra relacionada com a polidispersividade, sendo que quanto mais alargada for a distribuição da massa molecular, maior será o carácter reofluidificante apresentado pelo polímero, ou seja, uma distribuição molecular alargada provoca uma diminuição da viscosidade, como representado na Figura 5 [20]. Apesar de este parâmetro ter impacto na viscosidade, o seu maior efeito é o aumento da resistência a quente, o que se torna bastante vantajoso no caso da folha, uma vez que o seu propósito é ser termoformada e, como já explicitado anteriormente, esta resistência é importante nesse processo [42].

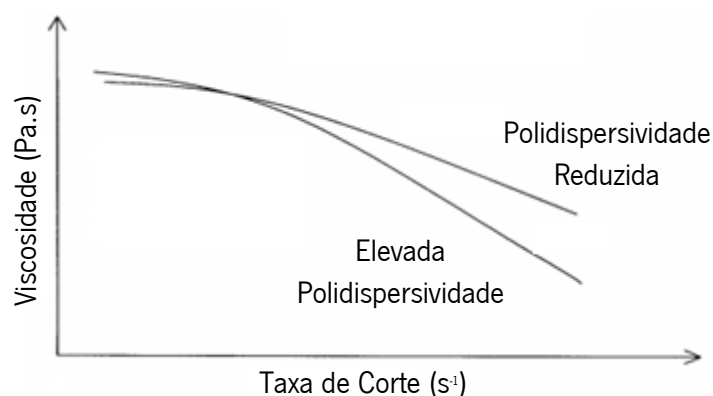


Figura 5 - Influência da distribuição da massa molecular na viscosidade para várias taxas de corte. Adaptado de [41].

Para além disto, a viscosidade é influenciada pelas variáveis operatórias, nomeadamente pela temperatura de processamento e pela taxa de corte imposta pela rotação do fuso, sendo que um aumento de qualquer destas variáveis provoca um decréscimo na viscosidade, como apresentado na Figura 6. Esta redução deve-se à maior mobilidade molecular e orientação molecular, como resultado da temperatura e da taxa de corte, respetivamente [4, 31, 41, 42, 44].

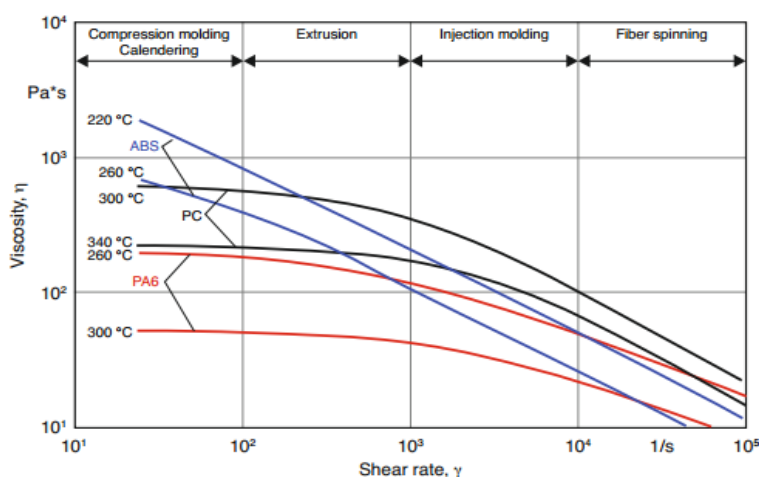


Figura 6 - Curvas de fluxo da poliamida 6 (PA6), policarbonato (PC) e acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) [4].

As relações explicitadas em conjunto com a fase de arrefecimento definem a morfologia da folha e as propriedades mecânicas que esta apresenta. Isto deve-se ao facto de durante um escoamento de corte, como o que se sucede dentro de uma extrusora, as moléculas serem alinhadas devido às forças que nelas atuam. Este alinhamento altera a disposição espacial dos átomos que constituem as moléculas, fazendo com que estas não se encontrem na conformação de menor energia. Posteriormente, quando o estímulo é retirado, as cadeias regressarão à conformação de menor energia, normalmente a conformação *trans*, formando um enovelamento aleatório. Contudo, se existir um arrefecimento rápido do polímero, estas cadeias não irão conseguir retornar a essa conformação, mantendo a sua orientação na direção da extrusão e originando tensões residuais [31, 45, 46].

No caso da co-extrusão de folhas multicamada, variáveis operatórias não ajustadas às propriedades reológicas dos materiais constituintes de cada camada podem provocar não conformidades, seja a nível do desempenho visual, mecânico ou de barreira, transformando-se numa perda de produto final.

2.3. MANUFATURA DE FOLHAS EM MATERIAL PLÁSTICO NA INDÚSTRIA DA EMBALAGEM

Folhas em material plástico são produzidas quando um material polimérico é processado, dando origem a um produto que pode variar em largura e em espessura, sendo por este último fator que se distingue entre filme e folha [12]. Uma folha de material plástico difere de filme na sua espessura. Apesar da distinção entre estes produtos não se encontrar formalmente estabelecida, consideram-se folhas os extrudidos com uma espessura superior a 200 μm [47].

Folhas são muito utilizadas na indústria da embalagem, especialmente quando combinadas com a co-extrusão, uma vez que esta técnica possibilita, de uma forma económica quando comparada com as outras opções, a formação de uma estrutura multicamada. Esta estrutura tira partido das propriedades individuais dos materiais que constituem cada camada, ultrapassando a impossibilidade de gerar uma folha com todas as propriedades requeridas apenas com um material e dando origem a uma folha otimizada à aplicação desejada [31, 38, 48–54].

Os principais componentes de uma linha de extrusão típica de folha para a indústria da embalagem, como a ilustrada na Figura 7, são:

- Sistema de alimentação, dosagem e mistura dos materiais;
- Extrusoras (para co-extrusão);
- Fieira;
- Calandra;
- Rolos de Passagem;
- Rolos de Puxo;
- Sistema de corte das tiras laterais;
- Bobinador.

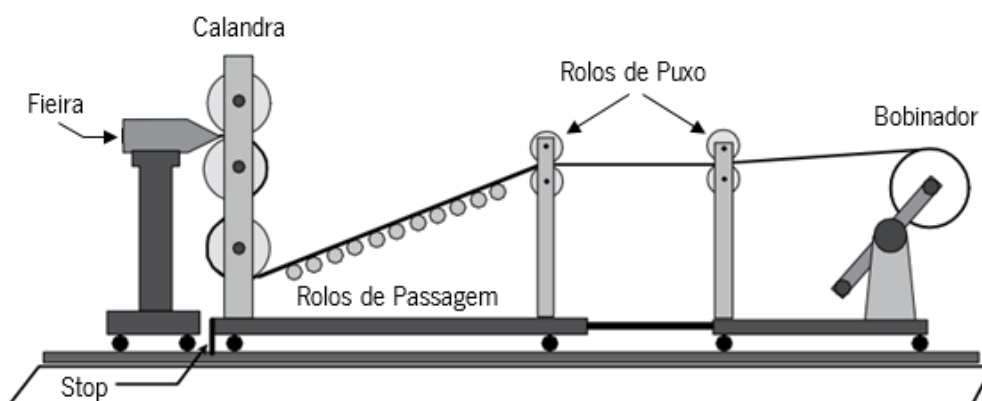


Figura 7 - Representação esquemática do equipamento auxiliar típico de uma linha de extrusão de folha. Adaptado de [47].

Como se pode observar, todos os componentes após a fieira se encontram ligados entre si e posicionados num sistema de carris, de forma a garantir o alinhamento entre a fieira e os componentes subsequentes. O alinhamento entre os componentes possui uma elevada importância, dado que previne o aparecimento de não conformidades, fruto de diferentes níveis de orientação molecular, cuja causa provenha do equipamento. O sistema de carris proporciona, por intermédio de um motor, o afastamento da calandra em relação à fieira, simplificando a limpeza dos cilindros da calandra e as operações de acoplamento e montagem/desmontagem da fieira. Em produção a calandra encontra-se o mais próximo possível da fieira [47].

Um aumento do débito provoca um aumento da produção. No entanto, esse aumento traduz-se num aumento da velocidade da linha e, consequentemente, da orientação molecular induzida na folha e dos níveis de contração que esta apresentará. Este efeito ocorre em polímeros amorfos e semicristalinos, sendo que neste último tipo de polímeros o aumento da orientação molecular promove um aumento da cristalização, o que reduz a transparência da folha [25].

2.3.1. CO-EXTRUSÃO

A co-extrusão, no caso da folha, é um método produtivo que recorre a várias extrusoras, pelo menos uma por polímero a ser processado, a trabalhar simultaneamente para a formação de uma folha, onde se pretende salvaguardar a existência de camadas paralelas segundo a espessura e não uma mistura dos materiais que as originaram. Este tipo de folhas é bastante utilizado como base para a subsequente termoformação, como é o caso das embalagens de margarina, iogurte, pudins, entre outros [52, 54, 55]. Na Figura 8 encontra-se representada uma estrutura multicamada típica formada a partir desta técnica.

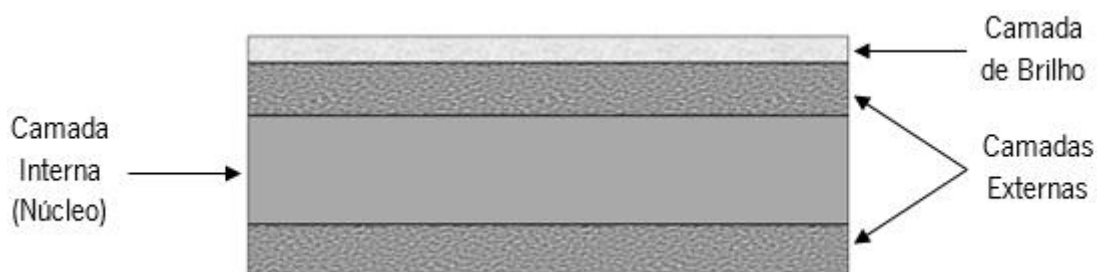


Figura 8 - Ilustração de uma possível estrutura multicamada (quatro camadas).

As extrusoras utilizadas na co-extrusão são extrusoras convencionais, o que significa que podem ser monofuso ou duplo fuso, sendo que dentro desta última categoria, podem ser co-rotativas ou contra-rotativas.

A junção das camadas pode ocorrer na própria feira ou num bloco distribuidor, sendo esta a opção mais comum. O bloco distribuidor efetua a junção das camadas imediatamente antes da feira, o que significa que os polímeros fluem no mesmo canal de escoamento, sendo as camadas igualmente deformadas na feira [54, 56]. Posto isto, a viscosidade dos polímeros deve ser semelhante, de forma a evitar instabilidade da interface entre camadas. Neste método, não é possível ajustar a espessura individual das camadas após o bloco distribuidor, apenas é possível um ajuste da espessura total da folha [56]. Uma representação do funcionamento do bloco distribuidor encontra-se apresentada na Figura 9.

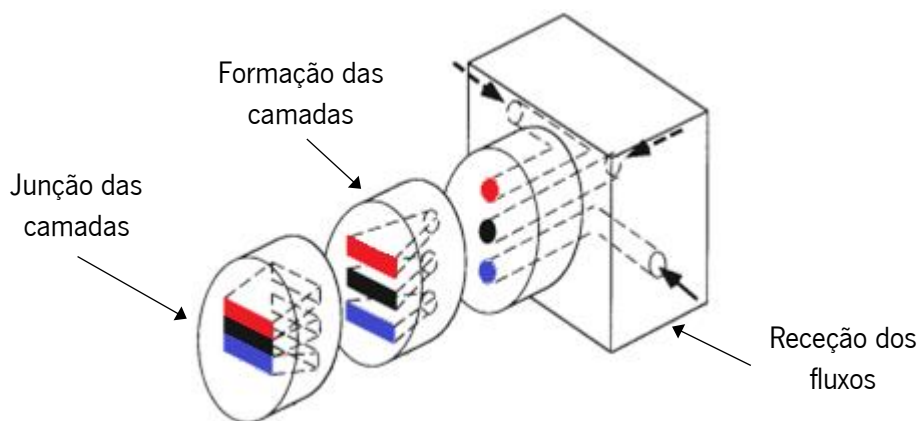


Figura 9 - Funcionamento de um bloco de distribuição. Adaptada de [56].

No eventualidade de a junção ocorrer na feira, esta possui múltiplas zonas de distribuição, de forma a garantir que os polímeros fluem separadamente ao longo do comprimento da feira, ocorrendo a união entre as camadas imediatamente antes da extrusão, como ilustrado na Figura 10. Este método é utilizado quando os polímeros a processar apresentam viscosidades bastante distintas, uma vez que mantem uma interface bem definida devido ao reduzido comprimento do canal no qual as camadas fluem em conjunto. No entanto, este sistema é mais dispendioso comparativamente ao bloco de distribuição, dada a geometria complexa da feira [54, 56].

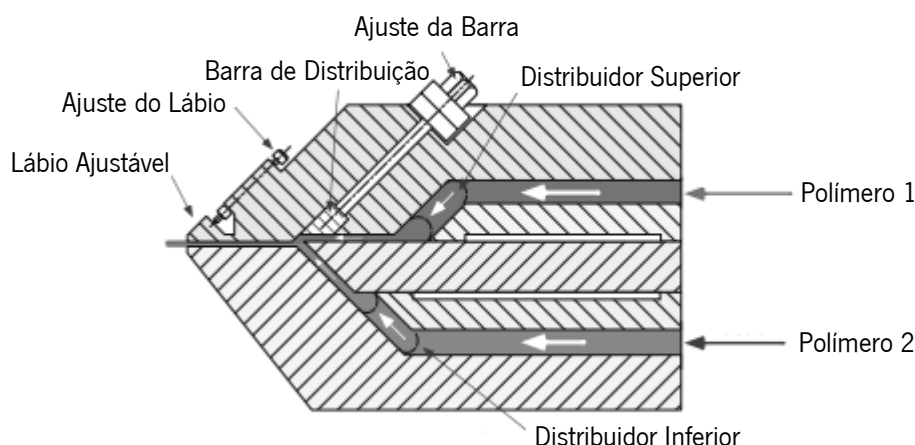


Figura 10 - Funcionamento de uma feira com múltiplas zonas de distribuição. Adaptada de [56].

Em ambos os métodos é imperativo que o fluxo de material se encontre no regime laminar, de forma a manter a interface bem definida, prevenindo que o material menos viscoso inicie um processo de encapsulamento do mais viscoso [26, 52, 57]. Na Tabela 1 encontra-se uma comparação entre os dois sistemas de co-extrusão apresentados anteriormente.

Tabela 1 - Comparação entre bloco distribuidor e feira com múltiplas zonas de distribuição. Adaptada de [35, 45, 56].

Bloco Distribuidor	Feira com Múltiplas Zonas de Distribuição
Económico	Dispendioso
Permite várias camadas	Permite um número limitado de camadas
Construção Simples	Construção Complexa
Viscosidades devem ser semelhantes	Viscosidades variáveis
Interface entre camadas aceitável	Boa interface entre camadas
Limitado a folhas e filme plano	Vários produtos

Uma terceira opção para a junção das camadas consiste na junção após a feira, ocorrendo o acoplamento das camadas entre a saída da feira e o sistema de arrefecimento [56]. Nesta opção a extrusão dos polímeros ocorre separadamente, possibilitando assim a utilização de materiais com propriedades reológicas distintas. Contudo, esta opção raramente é utilizada devido à reduzida adesão entre camadas resultante da falta de compressão e do arrefecimento da folha.

Para além das desvantagens já mencionadas, a co-extrusão representa um investimento inicial elevado, uma vez que que recorre a várias extrusoras numa só linha de extrusão, sendo este investimento

exacerbado pelo facto de ser necessário recorrer a blocos distribuidores ou a uma fieira com um nível de complexidade elevado e, conseqüentemente, um custo elevado.

A seleção dos materiais a utilizar também representa uma desvantagem desta técnica, uma vez que estes não se devem misturar durante o escoamento e devem ter afinidade química (serem compatíveis), para que origine uma interface forte e estável. Na eventualidade de a aplicação do produto requerer a utilização de dois polímeros incompatíveis pode ser introduzida uma camada entre eles, formada por um adesivo compatível com os dois polímeros. Contudo, este adesivo representa um material adicional a processar, implicando assim ajustes no processo [26, 52].

A separação dos materiais dos produtos multicamada manufaturados através da co-extrusão é limitada por motivos técnicos ou económicos. Esta limitação representa uma desvantagem, dado que apenas a utilização de matéria-prima uniforme e homogénea potencia a obtenção de um produto da reciclagem de elevada qualidade [58, 59]. Contudo, procede-se à reciclagem destas estruturas, tendo como resultado a formação de um novo composto. Na eventualidade de os materiais utilizados serem compatíveis, o novo composto pode ser vendido para aplicações cujos requisitos sejam cumpridos pelas propriedades do composto. No caso de os materiais serem incompatíveis, o composto não possuirá boas propriedades, representando um maior desafio do ponto de vista da sua utilização [60].

No entanto, para além de a co-extrusão permitir otimizar as propriedades da folha, como apontado anteriormente, esta possui um elevado número de outras vantagens em relação à extrusão convencional devido à sua estrutura multicamada, sendo elas:

- Introdução de cargas na(s) camada(s) interna(s), reduzindo assim os custos de produção, visto que a incorporação controlada destes elementos permite manter as propriedades desejadas enquanto reduz o conteúdo de polímero utilizado [8, 28, 49]. Nas camadas externas utiliza-se polímero virgem não aditivado de forma a prevenir interações entre a carga e o alimento por uma questão de segurança alimentar, visto que neste tipo de produtos é necessário considerar fatores como a toxicidade e a compatibilidade com o alimento [5].
- Inclusão de material reprocessado na(s) camada(s) interna(s), de forma a reduzir e, se possível, eliminar o desperdício gerado no processo, reduzindo custos de matéria-prima [52, 61]. Assim como no caso das cargas, introduz-se este material reprocessado numa camada interna, de modo a prevenir o contacto com o alimento, assim como para garantir a qualidade da camada externa [51, 56, 62].

-
- Formação de um núcleo celular, reduzindo a quantidade de material necessário para fazer uma folha, quando comparada a uma folha compacta, diminuindo os custos. Como resultado deste núcleo celular, a densidade da folha e, conseqüentemente, a sua massa serão menores, permitindo novas aplicações e abrindo novos mercados [49, 55].
 - Produção de folhas multicores [53, 54].
 - Produção de uma camada superficial de alto brilho, melhorando assim a sua qualidade superficial, bem como a qualidade de impressão [52, 63].
 - Inclusão de aditivos apenas na(s) camada(s) onde a sua ação é relevante, de modo a maximizar o seu efeito e reduzir custos com estes materiais. Os pigmentos são um exemplo deste tipo de aditivos, uma vez que a sua principal função é colorir a folha [31].

2.3.2. FIEIRA

A fieira é o componente responsável por dar a forma inicial ao fundido, convertendo o fluxo proveniente do bloco distribuidor num fluxo retangular, com a espessura definida pela abertura dos lábios, controlável através do ajuste do lábio superior, podendo atingir até quatro metros de largura. Como resultado desta conversão, são definidos diferentes trajetos pelo fundido e, como tal, diferentes quedas de pressão [47, 64].

Posto isto, a fieira deve possuir um distribuidor, de forma a garantir a distribuição desejada para o fluxo. Para além disso, deve compensar os diferentes trajetos, igualando a restrição ao escoamento, enquanto deve manter a interface entre as várias camadas bem definida [24, 26, 47, 49].

No entanto, oscilações das características da matéria-prima, assim como oscilações naturais do processo levam a uma elevada dificuldade em garantir a uniformidade do fluxo apenas com o desenho/geometria do canal de escoamento da fieira. Desta forma, as fieiras são dotadas de lábios ajustáveis, mencionados anteriormente, podendo também conter uma barra transversal de distribuição como meios de correção da altura local do canal de escoamento [24, 47, 56, 64]. Existe também a possibilidade de ajustar o fluxo através da temperatura das zonas da fieira, uma vez que temperaturas mais elevadas reduzem a viscosidade do polímero e, como resultado, facilitam o escoamento na zona em questão. Contudo, diferentes temperaturas do fundido geram diferentes taxas de arrefecimento, o que pode originar outro tipo de problemas [47, 56, 64].

A fieira mais comum é a fieira com distribuidor do tipo cabide (*coat hanger die*), representada na Figura 11, uma vez que é a que promove uma melhor distribuição do fluxo, sem a existência de zonas de estagnação, onde o fundido possa estagnar e degradar [56].

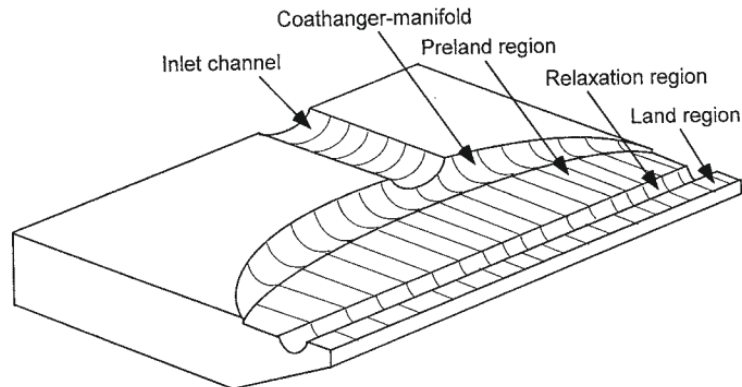


Figura 11 - Fieira com distribuidor do tipo cabide e as suas zonas [56].

Uma vez que seria inoportuno possuir uma fieira para cada largura de folha a produzir, recorre-se à combinação da produção de “bobines mãe”, que posteriormente são cortadas à medida desejada, com a colocação de calços na fieira, podendo estes ser internos ou externos, como forma de ajustar a largura da folha ao pretendido. Estes calços reduzem a largura do canal de escoamento e, como resultado, provocam uma redução da largura da folha. No entanto, a fieira de distribuidor tipo cabide é incompatível com calços internos, apenas permitindo a utilização de calções externos, sendo que nas extremidades onde estes atuam criam uma zona de estagnação do polímero, promovendo a sua degradação termo-oxidativa. Este fator leva à utilização destes calços apenas em polímeros termicamente estáveis [31, 47, 65, 66]. A colocação destes calços, assim como o fluxo do material na fieira encontra-se apresentada na Figura 12.

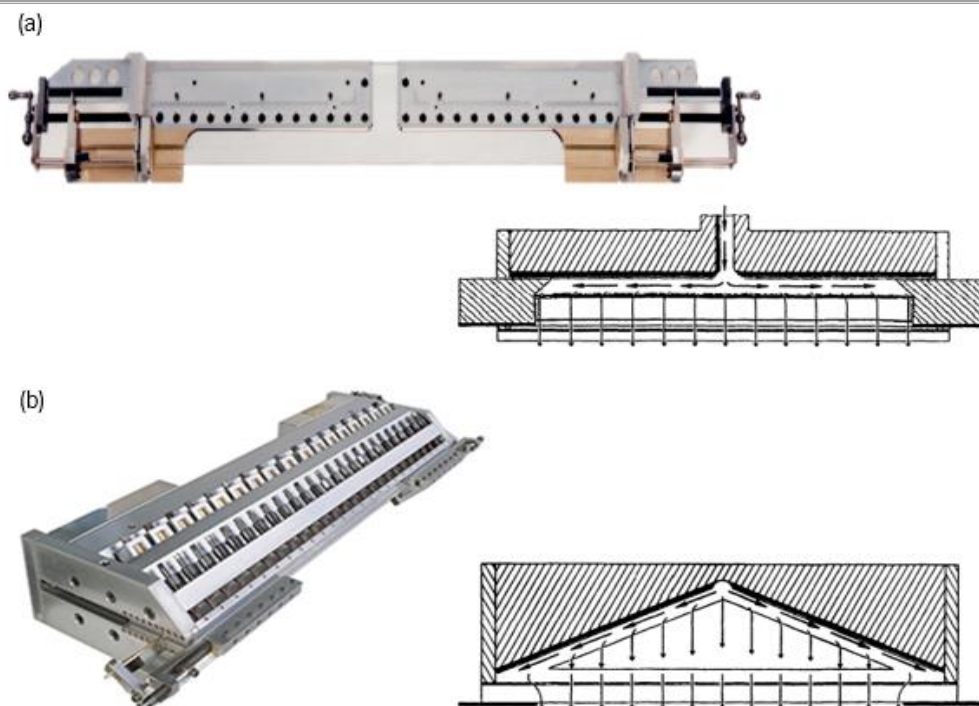


Figura 12 - Demonstração da colocação dos calços, bem como o respetivo fluxo, onde em (a) se encontram os calços internos e em (b) os calços externos. Adaptada de [66–68].

2.3.3. CALANDRA

No espaço entre a fieira e a calandra, denominado *air gap*, o polímero sofre fluxo extensional, sendo esta uma zona de elevada importância uma vez que três problemas típicos da extrusão de folha ocorrem nesta zona sendo eles o *draw resonance*, o *neck-in* e o *edge beading*, também conhecido como *dog bone effect* [65, 69].

O *draw resonance* caracteriza-se por uma flutuação periódica na largura e espessura da folha, bem como da tensão a que esta se encontra sujeita [31]. Este efeito surge quando a razão de estiramento, ou seja, a razão entre a velocidade tangencial dos cilindros da calandra e a velocidade de saída do polímero da fieira, atinge um nível crítico para o material, sendo que a sua viscosidade desempenha um papel preponderante [65, 70]. No caso de polímeros que apresentam um comportamento quase Newtoniano, tal como os poliésteres, a razão de estiramento crítica atinge um valor de aproximadamente vinte, enquanto que para polímeros não-Newtonianos os valores críticos são muito reduzidos, podendo atingir valores de apenas três [23]. De igual modo, as condições de processamento apresentam elevada importância, dado que se encontram diretamente ligadas às propriedades viscoelásticas, como apresentado anteriormente [64].

O *neck-in* é a redução da largura da folha como resultado do estiramento provocado pela calandra, encontrando-se este fenómeno diretamente ligado ao *dog bone effect* [71–73]. O *dog bone effect* é um aumento da espessura das extremidades da folha, sendo este aumento resultado do efeito de *neck-in*. Estas extremidades são posteriormente cortadas de forma a prevenir a ocorrência de não conformidades [65, 72–74]. Na Figura 13 encontram-se demonstrados os efeitos explicitados, onde a cinzento se encontra representada a secção transversal da folha.

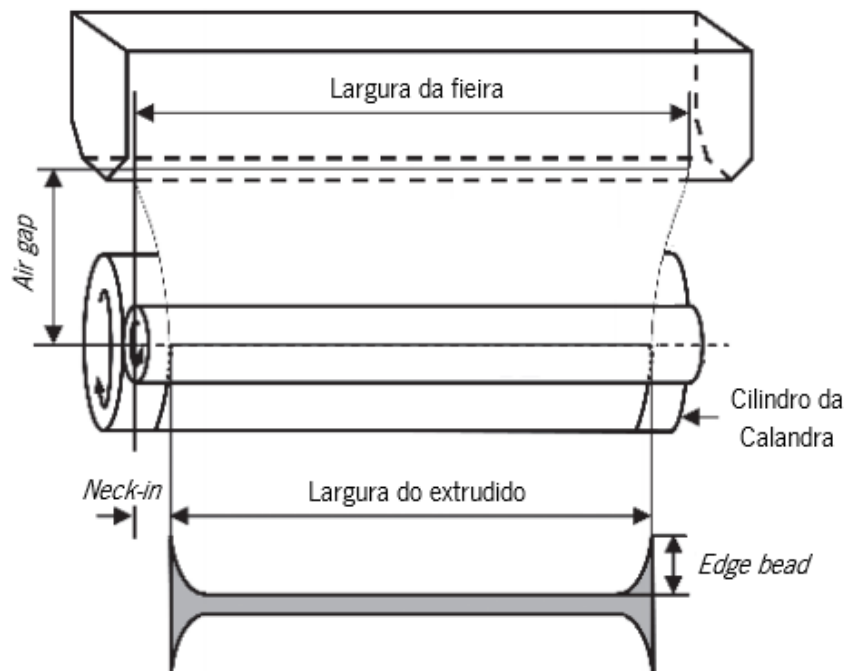


Figura 13 - Representação dos fenómenos *neck-in* e *dog bone*. Adaptada de [72]

Após o *air gap*, o fundido entra em contacto com a calandra, onde forma uma pequena acumulação de material fundido, demonstrada na Figura 14, denominada linha de compensação, cujo objetivo é uniformizar a espessura da folha [43].

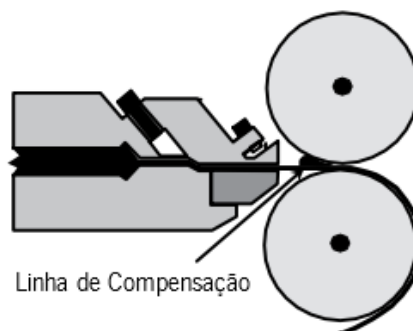


Figura 14 - Acumulação de material conhecida como linha de compensação. Adaptada de [47]

No entanto, esta linha deve ser muito bem controlada dado que a existência de demasiada acumulação, ou seja, duma linha de compensação demasiado elevada, pode levar à introdução de tensões no extrudido, uma vez que a acumulação funciona como uma restrição ao movimento livre do fundido. Esta restrição impõe uma taxa de corte no fundido, que, fruto do movimento molecular em escoamentos, orienta as moléculas na direção do fluxo. Por outro lado, uma linha de compensação reduzida pode originar uma espessura da folha não uniforme, devido à falta de material para compensar oscilações do processo. O controlo desta linha pode ser efetuado ajustando o débito, bem como a velocidade dos cilindros da calandra, sendo a quantidade de material utilizado para formar a linha de compensação dependente da massa molecular do polímero utilizado e, consequentemente, da sua viscosidade [47]. Após a linha de compensação o fundido inicia o seu percurso na calandra.

A calandra controla a espessura da folha, o acabamento superficial e a taxa de arrefecimento, sendo que este arrefecimento ocorre devido à transferência de calor por condução entre os cilindros da calandra e a folha [26, 47]. Nestes cilindros existe a circulação de água ou óleo de forma a controlar a sua temperatura, mantendo-a constante e uniforme. Esta uniformidade é vital para a produção de uma folha livre de não conformidades uma vez que, aliada à utilização dos diversos cilindros da calandra, permite induzir um perfil de temperaturas quase simétrico segundo a espessura [47, 75]. A uniformidade do arrefecimento possui um papel ainda mais fulcral no caso de folhas co-extrudidas, uma vez que com a utilização de diferentes materiais para a formação das camadas, advêm diferentes taxas de contração características do polímero. Esta diferença pode gerar empenos na folha caso a sua estrutura e arrefecimento não sejam simétricos [50].

Sabe-se que a temperatura dos cilindros em conjunto com o ângulo de contacto entre a folha e os cilindros dita a taxa de arrefecimento da folha, possuindo assim uma elevada influência na morfologia e nas propriedades mecânicas resultantes para a folha extrudida [25, 39]. Uma folha forma uma casca de ambos os lados à medida que é arrefecida, sendo a espessura dessa casca determinada pela temperatura dos cilindros, bem como pelo ângulo de contacto com os mesmos [47]. Esta taxa de arrefecimento é ainda mais importante no caso dos polímeros semicristalinos uma vez que o grau de cristalinidade, bem como a espessura das estruturas cristalinas, aumenta com o decréscimo da taxa de arrefecimento, como resultado da maior mobilidade molecular existente. [25, 64]. Posto isto, para aplicações onde são requeridos níveis elevados de transparência a polímeros semicristalinos devem-se impor elevadas taxas de arrefecimento.

Para obter um bom acabamento superficial e elevado brilho os cilindros da calandra devem ser extremamente polidos. Isto deve-se ao facto de o polímero se encontrar sob tensão à medida que contacta com estes cilindros, tendo assim tendência a assumir a sua rugosidade, ou seja, a rugosidade superficial do cilindro traduz-se numa rugosidade superficial da folha [31, 76].

2.3.4. ROLOS DE PUXO

Uma vez arrefecido o extrudido é encaminhado para os rolos de puxo, revestidos com um elastómero, que promovem um puxo constante e uniforme. A velocidade dos rolos de puxo encontra-se, por norma, sincronizada com a velocidade do cilindro central da calandra, de forma a prevenir o estiramento da folha entre estes dois componentes, bem como o seu escorregamento na calandra [15, 47]. Contudo, os rolos de puxo devem possuir um sistema de controlo de velocidade, reduzindo-a ligeiramente em relação à velocidade do cilindro da calandra de forma a compensar a contração longitudinal da folha, promovida pelo seu arrefecimento.

Quando a folha já se encontra a ser transportada por estes rolos e a alimentar o bobinador, o equipamento de corte das extremidades laterais da folha, que se encontra entre os rolos de puxo e o bobinador, é ativado. O corte das extremidades deve-se ao facto de estas não apresentarem a mesma qualidade que a restante folha devido ao efeito *dog bone* mencionado anteriormente, bem como devido a diferenças de coloração, no caso de folhas coloridas. A necessidade de cortar estas extremidades é especialmente elevada no caso de folhas co-extrudidas, dado que é nesta zona onde é mais visível o encapsulamento do material mais viscoso [47].

2.3.5. BOBINADOR

O bobinador é responsável por enrolar a folha e manter uma operação constante através dos dois mandris que estes possuem. Neste tipo de bobinador, no momento em que uma bobine atinge o diâmetro ou massa pretendida, dá-se o corte da folha, sendo esta enrolada no mandril disponível. Por norma coloca-se um tubo de cartão entre a folha e o mandril [47].

Existem dois sistemas de bobinagem muito usuais, designados central e por contacto, ilustrados na Figura 15.

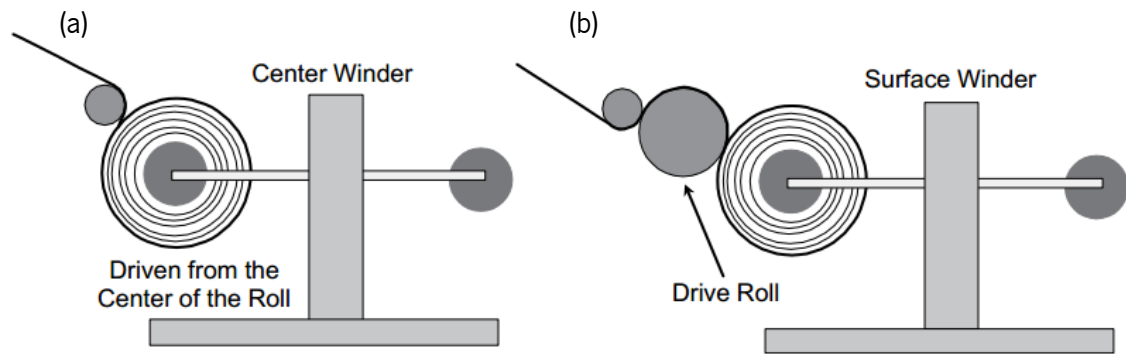


Figura 15 - Sistema de bobinagem central (a) e por contacto (b) utilizados numa linha de extrusão de folha. Adaptada de [47]

No sistema de bobinagem central é mais fácil manter uma tensão constante na bobine devido ao facto de ser possível programar o torque gerado pelo motor que controla o mandril. Contudo, isto resulta num custo mais elevado, quando comparado ao sistema por contacto [31, 47].

No sistema de bobinagem por contacto é colocado um rolo em contacto com a folha, forçando a rotação do mandril. Uma vez que a velocidade de rotação do rolo é constante, à medida que a bobine cresce verifica-se um aumento da inércia, causando uma tensão não uniforme ao longo do diâmetro da bobine [31, 47].

3.1. POLIESTIRENO

O poliestireno (PS) é um dos termoplásticos mais antigos e deve a sua longevidade no mercado à sua facilidade de processamento e ao constante desenvolvimento das suas propriedades, tornando-o apropriado para aplicações que incluem a eletrónica e biologia, para além da embalagem [77–79].

Este polímero é um polímero amorfo que pode ser obtido a partir do monómero de estireno, dando origem a uma cadeia semelhante à do polietileno, mas com anéis de benzeno, como demonstrado na Figura 16, proporcionando uma temperatura de transição vítrea elevada (T_g), por volta dos 90°C [80].

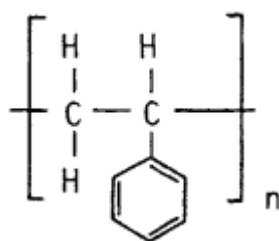


Figura 16 - Fórmula genérica da unidade repetitiva do poliestireno [81].

Industrialmente são muito utilizados dois tipos de poliestireno, o poliestireno homopolímero, conhecido por *general-purpose polystyrene* (GPPS) e o um poliestireno modificado, denominado *high-impact polystyrene* (HIPS), assim como misturas destes polímeros.

3.1.1. GENERAL-PURPOSE POLYSTYRENE (GPPS)

O poliestireno homopolímero, comumente denominado de GPPS, é um polímero amorfo e, por isso, transparente, com elevada versatilidade devido à facilidade de processamento, rigidez, estabilidade dimensional e elevado brilho, apresentando uma janela de processamento entre os 170°C e os 240°C [61, 78, 80]. O facto de este polímero ser facilmente colorido apresenta-se como outro fator de elevada importância dado que na indústria da embalagem são requeridas diferentes cores aos produtos. A facilidade da impressão é igualmente dependente desta característica do material [61, 82]. Estas propriedades aliadas ao seu custo competitivo permitem ao poliestireno competir com polímeros cujo custo e desempenho seria, de forma expectável, superior [61]. No entanto, a baixa mobilidade das cadeias moleculares, devido à presença do anel de benzeno, reduz a energia que o GPPS consegue

absorver sob impacto, ou seja, reduz a sua resistência ao impacto, como exposto na Tabela 2, limitando a sua utilização [77, 78, 80].

Tabela 2 - Valores relativos às propriedades mecânicas do GPPS [4, 83].

Propriedade	Valor
Massa específica (g/cm³)	1,04 – 1,05
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	3,2 – 3,25
Tensão de rotura (MPa)	30 – 60
Deformação de rotura (%)	1 – 4
Resistência ao impacto (Jm⁻¹)	13 – 25

A fragilidade do GPPS é tão elevada que folhas deste material fraturam ao serem perfuradas pelas guias da termoformadora [84]. Como tal, este polímero é muito utilizado para produtos que não tenham como requisito uma elevada resistência do impacto, tais como cabines de duche e candeeiros [80].

3.1.2. *HIGH-IMPACT POLYSTYRENE (HIPS)*

O HIPS é um copolímero à base de estireno enxertado com butadieno, tipicamente numa percentagem inferior a 10%, sob o mecanismo apresentado na Figura 17. Este copolímero, cuja janela de processamento se encontra entre os 180°C e 220°C, foi desenvolvido para aumentar a resistência ao impacto do poliestireno, mantendo a boa processabilidade do GPPS [4, 62, 77, 85, 86].

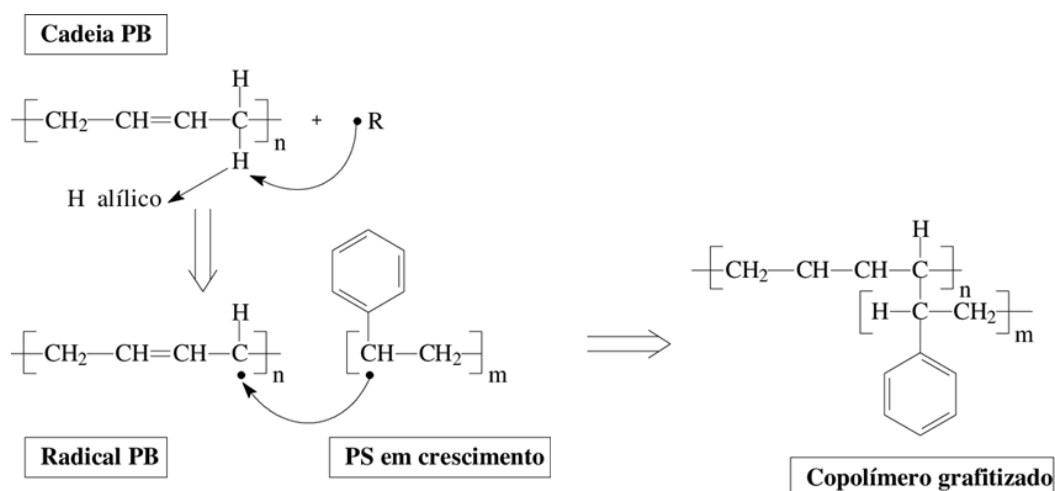


Figura 17 - Mecanismo de formação de HIPS, no qual $R\cdot$ representa um radical livre. Adaptada de [87].

A adição de butadieno provoca a formação de um polímero no qual são distinguíveis duas fases, visíveis na Figura 18, a fase contínua formada pelo PS e a fase dispersa, constituída pelos fragmentos de elastómero, sendo a adesão interfacial destas duas fases preponderante para um bom desempenho do HIPS [42, 78].

As propriedades apresentadas pelo HIPS são afetadas pelo tamanho dos fragmentos de butadieno, que podem variar entre os 0,5 e os 10 micrómetros, sendo possível controlar o tamanho, bem como a sua distribuição, pela taxa de corte do processo de polimerização [86–88]. Este controlo permite produzir graus de HIPS específicos, respondendo assim às necessidades de milhares de aplicações. Na Tabela 3 encontram-se explicitados os valores genéricos das propriedades mecânicas do HIPS.

Tabela 3 - Valores das propriedades mecânicas do HIPS [83].

Propriedade	Valor
Massa específica (g/cm³)	0,98 – 1,10
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	1,5 – 2,5
Tensão de rotura (MPa)	15 – 40
Deformação de rotura (%)	15 – 60
Resistência ao impacto (Jm⁻¹)	50 – 400

O mecanismo de funcionamento do HIPS baseia-se na concentração da energia fornecida pelo impacto nos fragmentos de butadieno, bem como na matriz polimérica circundante, causando a cedência apenas da zona afetada, prevenindo a propagação da energia e a falha catastrófica típica do poliestireno [45, 89]. Este mecanismo encontra-se representado na Figura 18.

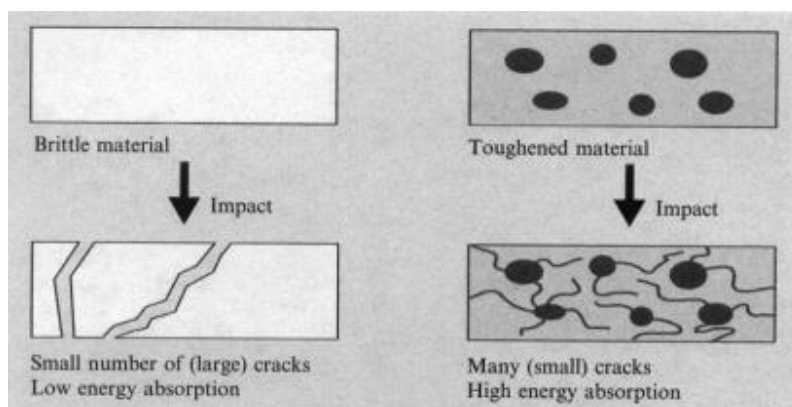


Figura 18 - Comparação do comportamento do GPPS e do HIPS quando expostos a impacto [80].

No entanto, o aumento verificado na resistência ao impacto é efetuado à custa duma redução de outras propriedades mecânicas, nomeadamente, do módulo de elasticidade e da tensão máxima, como representado na Figura 19, bem como da sua transparência, fruto da dispersão luminosa causada pelos fragmentos de butadieno [77, 80].

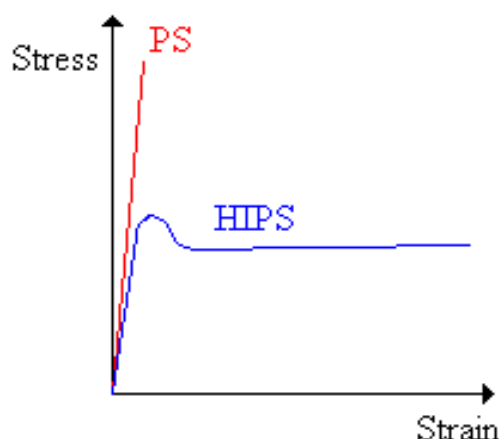


Figura 19 - Comparação das curvas tensão-deformação do GPPS e do HIPS [90].

Devido ao tipo de elastómero utilizado, este polímero é bastante suscetível à degradação por ultravioletas, iniciando-se essa degradação na camada exterior e migrando, posteriormente, para a(s) camada(s) interna(s) [31].

3.1.3. MISTURA GPPS/HIPS

Misturas de polímeros são misturas físicas de dois ou mais compostos macromoleculares, podendo estes ser polímeros e/ou copolímeros. A mistura de materiais tem como objetivo a combinação das propriedades dos seus componentes, possibilitando a obtenção de uma morfologia otimizada a determinadas aplicações. Esta técnica representa uma alternativa menos dispendiosa à criação de um novo polímero com as propriedades desejadas, podendo, inclusivamente, atingir propriedades superiores às previstas devido à sinergia entre os componentes [4, 45, 91–93].

Uma consideração importante na mistura de polímeros trata-se da compatibilidade entre os constituintes, ou seja, se estes são miscíveis ou imiscíveis, dado que a miscibilidade dita a morfologia da mistura. Quando os polímeros utilizados na mistura são miscíveis, esta apresenta apenas uma temperatura de transição vítrea que se encontra dependente da composição da mistura [93].

No entanto, na maioria dos casos os polímeros são imiscíveis, ou seja, uma das fases encontra-se dispersa na fase contínua, originando dois valores para a temperatura de transição vítrea e, no caso dos polímeros semicristalinos, as zonas cristalinas apresentam temperatura de fusão [93].

Posto isto, a manipulação de propriedades recorrendo à mistura de GPPS e HIPS, gera uma mistura com níveis intermédios de elastómero que, em conjunto com a técnica de co-extrusão, permite obter uma folha que se pode termoformar, encher e selar com uma elevada velocidade e eficiência [62, 77].

A combinação destes materiais permite ultrapassar a fragilidade do poliestireno através do elastómero presente no HIPS e manter a facilidade de processamento do GPPS, sendo as folhas manufaturadas a partir desta mistura predominantemente utilizadas para aplicações como os copos de iogurte e sobremesas. A melhoria do comportamento mecânico como resultado da mistura destes polímeros é benéfica à temperatura ambiente, bem como às temperaturas às quais os produtos lácteos são preservados, isto é, ao nível do campo de aplicação das folhas [62, 85].

3.2. POLI(TEREFTALATO DE ETILENO)

O poli(tereftalato de etileno) (PET) é um polímero semicristalino pertencente à família dos poliésteres, com uma janela de processamento entre os 260°C e 300°C, extremamente versátil e de elevada massa molecular, formado a partir da combinação de ácido tereftálico ou tereftalato de dimetila com etileno glicol. A estrutura química do monómero de PET representada na Figura 20 [45, 94, 95].

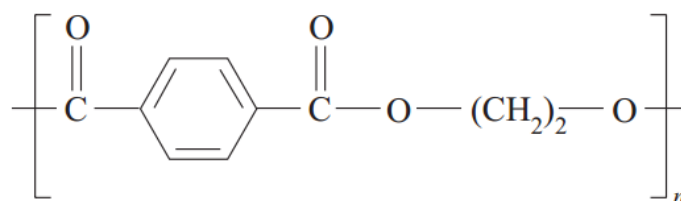


Figura 20 - Fórmula genérica da unidade repetitiva do PET [96].

A versatilidade do PET, fruto da sua flexibilidade, boas propriedades barreira, durabilidade, transparência e excelente resistência a uma vasta gama de químicos à temperatura ambiente, fazem com que seja o poliéster termoplástico mais utilizado. Como exemplo de aplicações deste material podem referir-se fibras, embalagem alimentar, garrafas, filmes fotográficos, bem como aplicações na indústria automóvel e elétrica [61, 95, 97–99].

Dependendo das condições de processamento, o PET pode existir na sua forma amorfa, denominada aPET, ou na sua forma cristalina, denominada CPET, sendo mais comum a sua forma amorfa [82, 100]. Isto deve-se ao facto de o aPET apresentar uma transparência elevada, transformando-o numa opção bastante atrativa na produção de folhas e, posteriormente, de produtos termoformados cujo objetivo é a transparência da embalagem. O CPET tem como principal vantagem a sua maior resistência a temperaturas elevadas, porém a sua transparência é inferior à verificada no aPET, como resultado de estruturas cristalinas de maiores dimensões. Estas estruturas causam a difusão da luz incidente, conferindo à folha uma maior opacidade [94].

As propriedades mecânicas encontram-se ligadas à morfologia adotada pelo material semicristalino, ou seja, depende da percentagem da fase cristalina e da fase amorfa por ele apresentadas [101]. Desta forma, o PET apresenta-se como um polímero com comportamento dúctil, uma deformação e tensão de rotura bastante elevadas. Na Tabela 4 apresentam-se valores relacionados das propriedades mecânicas do PET.

Tabela 4 - Valores das propriedades mecânicas do PET [4, 83].

Propriedade	Valor
Massa específica (g/cm³)	1,29 – 1,40
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	3,1
Tensão de rotura (MPa)	50
Deformação de rotura (%)	50 – 300
Resistência ao impacto (Jm⁻¹)	12 – 40

Apesar da versatilidade e das boas propriedades que o PET apresenta, devido à sua microestrutura específica e por ser um polímero formado por polimerização por condensação, apresenta carácter higroscópico, ou seja, absorve humidade do ar. Esta humidade causa a sua degradação por hidrólise quando processado a elevadas temperaturas, sendo que a taxa de degradação por hidrólise consegue ser superior à taxa de degradação térmica e oxidativa [75, 100, 102]. Esta degradação deve-se ao carácter reversível da reação que ocorre entre os componentes que dão origem a este polímero durante a polimerização [95].

A humidade em excesso pode-se manifestar de várias formas, dependendo da técnica de processamento utilizada. Porém, a forma mais comum da humidade se manifestar é a redução da massa

molecular do polímero, o que resulta num decréscimo das suas propriedades, principalmente nas propriedades mecânicas, como se pode verificar na Figura 21. A humidade pode, inclusivamente, resultar no aparecimento de não conformidades [61, 102].

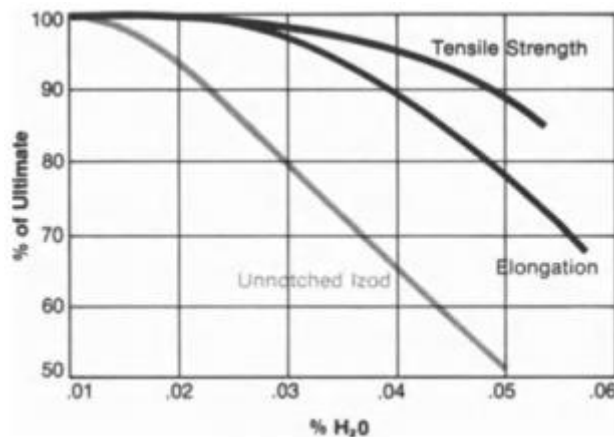


Figura 21 - Efeito da humidade nas propriedades mecânicas do PET [61].

Maiores temperaturas de processamento toleram, por norma, menores quantidades de humidade na matéria-prima, uma vez que as maiores temperaturas originam uma maior quantidade de voláteis para a mesma percentagem de humidade [31].

O facto de o PET ser higroscópico também tem influência nas propriedades reológicas do material, nomeadamente, na viscosidade que, neste tipo de polímeros, se trata de viscosidade intrínseca. A viscosidade intrínseca é uma forma de quantificar a fluidez de um material através da sua dissolução num solvente, relacionando, posteriormente, a massa molecular do polímero à viscosidade da solução [103].

A adoção da viscosidade intrínseca em polímeros higroscópicos deve-se à impossibilidade em determinar um valor real de viscosidade por métodos tradicionais, sem haver humidade e consequente degradação. Isto deve-se à humidade absorvida entre a secagem deste material e os métodos de medição da viscosidade utilizados, resultando num valor de viscosidade em função de uma percentagem de humidade absorvida.

3.3. GPPS/HIPS VS PET

Em anexo (Anexo A -) encontra-se explicitado um resumo dos tópicos a ser abordados nesta seção.

3.3.1. EXTRUSÃO

O PET, como mencionado anteriormente, absorve a humidade o que promove a sua degradação durante a fase de processamento. Esta característica gera a necessidade de retirar essa humidade por meio de um equipamento adicional, neste caso um desumidificador, que, por sua vez, representa mais custos, quer do ponto de vista da aquisição do equipamento, quer do ponto de vista energético [15].

De igual modo, existe a possibilidade de a desumidificação do PET ocorrer dentro da extrusora, recorrendo a sistemas de alto vácuo (*High Vacuum Twin Screw Extrusion – HVTSE*). Este sistema recorre a extrusoras duplo fuso ventiladas ligadas a um sistema de alto vácuo para retirar a humidade presente na matéria-prima, prevenindo assim a degradação do mesmo e originando uma folha com um nível de qualidade dentro do desejado. No entanto, é extremamente importante que o sistema de vácuo se encontre estável e sem fugas, caso contrário não será eficaz.

Já no caso da mistura GPPS/HIPS não existe a necessidade de efetuar secagem, uma vez que esta origina uma folha de qualidade sem recorrer a esta etapa adicional.

Ao nível da extrusão, o PET requer um perfil de temperatura das resistências inverso ao normalmente utilizado, ou seja, nas primeiras zonas é onde se verifica uma temperatura mais elevada, como forma de promover a fusão do material, o que permite aos voláteis escapar pela zona de degaseificação, impedindo a degradação do PET. Esta inversão previne a existência de pulsação, isto é, variações no débito da extrusora, que se traduzem em variações de espessura da folha, potenciando a qualidade da folha. É de notar que, como resultado da sua elevada temperatura de fusão, a janela de processamento de PET (240°C a 290°C) é superior à da mistura GPPS/HIPS (aproximadamente 170°C a 240°C), o que significa uma maior temperatura das resistências e, consequentemente, um maior gasto energético [15, 102].

O PET requer também a utilização de filtros com malha mais fina, quando comparada à dos filtros utilizados na extrusão da mistura GPPS/HIPS. Isto deve-se ao facto de o PET apresentar uma

fluidez mais elevada, requerendo assim uma maior filtragem para retirar as impurezas e géis (material não fundido) que se encontram no fundido.

Estes dois sistemas poliméricos também provocam diferenças na montagem da fieira, mais propriamente, a nível dos calços explicitados na secção 2.3.2. O PET degrada facilmente pelo que na sua extrusão é usual a utilização de calços internos combinados com calços externos como prevenção dessa degradação, uma vez que, como explicitado anteriormente, a utilização de apenas calços externos cria zonas de estagnação, promovendo a degradação das matérias-primas termicamente sensíveis. A extrusão da mistura GPPS/HIPS, devido à sua maior estabilidade, pode ocorrer apenas com a utilização de calços externos.

No arrefecimento da folha é necessário ter especial atenção à temperatura dos cilindros da calandra ao trabalhar com PET, dado que este material necessita de ser arrefecido rapidamente como forma de conferir alguma consistência à folha, permitindo efetuar a calandragem, bem como para prevenir a cristalização [102].

A mistura GPPS/HIPS dá origem a uma folha com algum brilho. Todavia, quando se deseja que o produto final possua um brilho elevado, de forma a apelar ao consumidor, extrude-se uma camada de GPPS de espessura extremamente reduzida, dado que este polímero possui um brilho superior ao da mistura. A espessura desta camada é extremamente importante, uma vez que esta fragiliza as camadas da mistura, podendo dar origem a um fenómeno conhecido como destruição mútua entre camadas, do inglês *mutual interlayer destruction*. Este fenómeno deve-se ao facto de o polímero com melhor desempenho mecânico, neste caso a mistura, não ser capaz de interromper a fratura que se inicia na camada de GPPS, fraturando no mesmo local da camada de brilho. Isto dá origem a uma fratura localizada sem recurso a um estímulo intenso [49]. No PET a destruição mútua entre camadas não representa um problema uma vez que este polímero apresenta um brilho natural superior ao registado pela mistura GPPS/HIPS, bem como devido à sua ductilidade.

3.3.2. TERMOFORMAÇÃO

As características dos poliestirenos mencionadas anteriormente levaram esta família de polímeros a ser das mais utilizadas na indústria da embalagem, especialmente quando um dos processos envolvidos é a termoformação. Esta técnica consiste no aquecimento de uma folha até esta se tornar

facilmente deformável com aplicação de baixos gradientes de pressão, cujo intuito é a reprodução dos contornos de um molde. Esta deformação pode ser realizada por aplicação de vácuo ou de ar sob pressão, sendo as forças responsáveis por essa deformação de reduzida intensidade. Alternativamente, a deformação pode ocorrer por ação de elementos mecânicos [12, 104–108].

O aquecimento efetuado nesta técnica também representa uma adversidade para a utilização de PET, visto que promove a cristalização térmica do material, ou seja, a formação de estruturas esferulíticas, o que resulta numa perda de transparência [109]. De forma a minimizar esta contrariedade, a folha de PET deve ser aquecida até à temperatura de enformação no menor tempo possível [102].

3.3.3. PRODUTO FINAL

Na consideração do desempenho do produto final, o fator que tem sido decisivo na escolha da mistura para a formulação das folhas baseia-se na facilidade de fratura que este material apresenta. Nos *packs* de copos de poliestireno conseguem-se separar facilmente as unidades individuais do resto do conjunto [62]. A ductilidade do PET não possibilita esta fratura de forma fácil, sendo que para facilitar esta separação efetuam-se cortes relativamente fundos onde se pretende que a fratura ocorra. Porém, isto não é atrativo, visto que estes cortes reduzem a resistência do material de tal forma que ao manusear o *pack* este pode-se separar em unidades individuais de modo inesperado.

A fratura pode ainda ser facilitada pela adição de elevadas quantidades de carga, aproximando o comportamento mecânico do PET ao da mistura de GPPS/HIPS. Todavia, esta adição torna o copo pesado e não atrativo, para além de reduzir a sua sustentabilidade ambiental, uma vez que torna a sua reciclagem muito mais difícil [110, 111].

Uma consideração extremamente importante na escolha do material de uma embalagem é a interação entre a embalagem e o produto embalado, mais propriamente, a migração de potenciais substâncias tóxicas, como certos aditivos ou monómeros, que ponham em causa a qualidade do alimento [112, 113]. Neste caso, o PS encontra-se em desvantagem quando comparado com o PET, dado que o monómero de estireno é considerado uma dessas substâncias, existindo a sua migração quando o produto é exposto a elevadas temperaturas ou a duração do seu contacto direto com o alimento é superior ao permitido [114]. Isto faz com que o PS se encontre com a classificação 2A (a substância é

provavelmente carcinogénica para humanos), a segunda mais grave da *International Agency for Research on Cancer* (IARC) [115].

Quando o objetivo do produto final implica o processo de enchimento a quente (*hot-fill*), cujo principal objetivo é fornecer um produto livre de microrganismos capazes de se desenvolverem, ou seja, um produto comercialmente estéril, o PET encontra-se em desvantagem em relação à mistura. Este facto é ainda mais crítico se um dos requisitos for a transparência do recipiente, dado que nesse caso serão folhas em aPET, cuja resistência à temperatura é inferior à do CPET. Isto deve-se ao facto de as temperaturas de serviço muito elevadas (superiores a 80°C), características do enchimento a quente, serem sempre superiores à temperatura de transição vítrea deste material (74°C), provocando a distorção ou colapso térmico das finas paredes laterais do recipiente [116–119]. Na mistura isto não se verifica, uma vez que a temperatura de transição vítrea deste material ronda os 90°C.

3.3.4. RECICLAGEM

A dimensão crescente da população mundial aliada à melhoria do nível de vida levou a um maior consumo de materiais plásticos que, por sua vez, se traduziu num incremento da quantidade deste tipo de materiais que acaba na cadeia de resíduos [58].

A utilização de material reciclado tem um elevado número de benefícios tais como, a menor poluição, a preservação de recursos naturais e a redução do espaço ocupado em aterros [120]. Desta forma, ao efetuar a comparação entre duas matérias-primas é importante investigar a sua reciclabilidade e a possibilidade de fechar o ciclo da economia circular.

A existência de uma quantidade elevada de resíduos de PET relativamente limpos, o que torna a reciclagem uma tarefa mais fácil, bem como as recentes tendências de reciclagem em torno deste material, levam a que os seus níveis de reciclagem ultrapassem os 10%. Isto torna-se uma vantagem em relação ao PS, cuja reciclagem é quase inexistente, uma vez que esta não é economicamente viável para este material, como, por exemplo, no caso do poliestireno expandido (EPS) [121, 122]. Dados relativos à produção e recolha dos polímeros mais utilizados são visíveis na Tabela 5.

Tabela 5 - Polímeros utilizados nos Estados Unidos em 2012 e respectivas quantidades [123].

Polímero	Manufatura (tonelada)	Recolha		Descartadas (toneladas)
		Tonelada	(%)	
PET	4520	880	19.5	3640
HDPE	5530	570	10.3	4960
PVC	870	—	—	870
LDPE/LLDPE	7350	390	5.3	6960
PLA	50	—	—	50
PP	7190	40	0.6	7150
PS	2240	20	0.9	2220
Outros	4000	900	22.5	3100
Total	31,750	2800	8.8	28,950

Para além de ser necessário investigar a reciclabilidade dos materiais, deve-se verificar, uma vez que a aplicação desejada envolve contacto alimentar, se o polímero reciclado cumpre os requisitos de segurança desta indústria, obtendo assim a aprovação necessária para ser utilizada neste tipo de aplicações [97].

Polímeros como o PET, cuja proveniência de material para reciclagem são fontes de resíduos relativamente limpas, como as garrafas de água, apresentam elevados níveis de reintegração em aplicações com contacto alimentar. Este fator leva a que existam mais de 160 graus (*grades*) de rPET aprovados pela FDA para contacto alimentar, sendo que o PS tem apenas cerca de 23 (*grades*) aprovados [120, 124].

No entanto, a reciclagem do PET tem alguns inconvenientes, nomeadamente a sua perda de propriedades com o aumento do número de ciclos a que foi sujeito, como demonstrado nas Figura 22 a Figura 24. Isto deve-se à redução da massa molecular do polímero como resultado da cisão das cadeias macromoleculares, sendo esta cisão fomentada pela presença de humidade e pelas taxas de corte no momento da reciclagem [100].

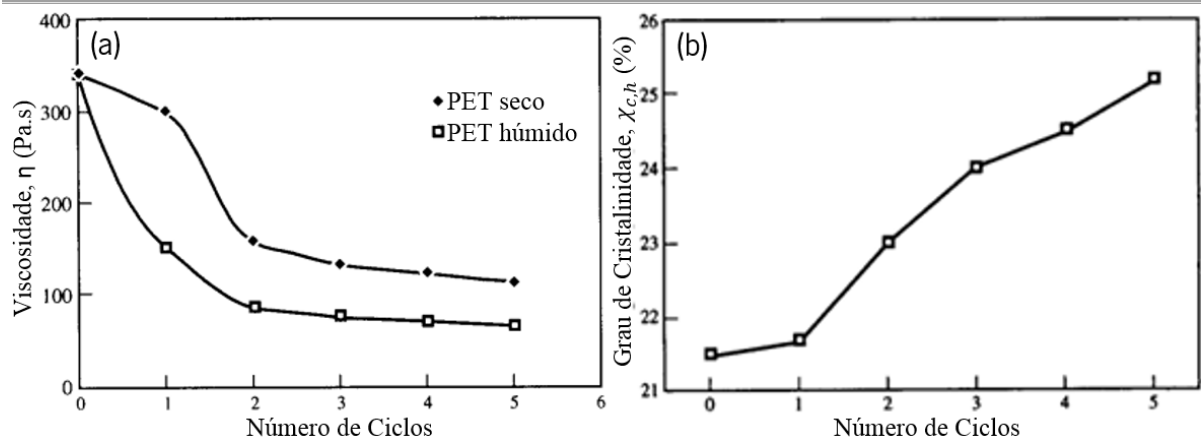


Figura 22 - Efeito do número de ciclos na viscosidade Newtoniana para PET seco e PET húmido em (a) e no grau de cristalinidade em (b).

Adaptada de [125].

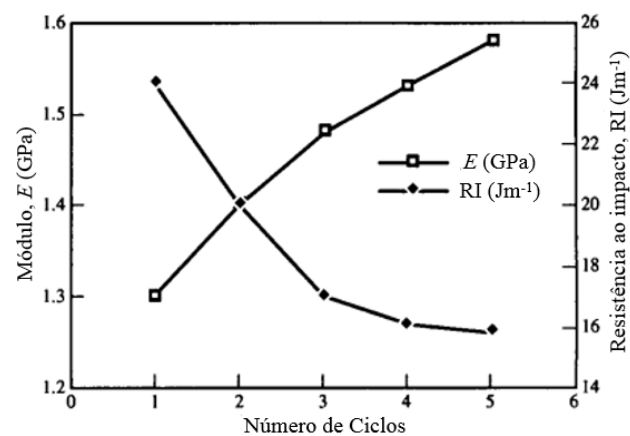


Figura 23 - Efeito do número de ciclos no módulo de elasticidade, E , e na resistência ao impacto, RI . Adaptada de [125].

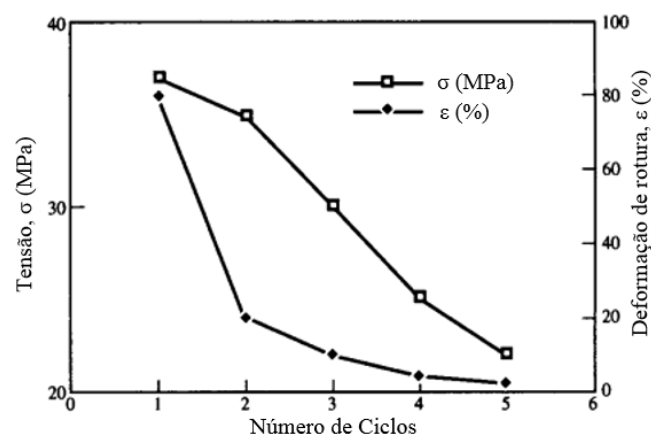


Figura 24 - Efeito do número de ciclos na tensão de rotura, σ , e na deformação de rotura, ϵ . Adaptada de [125].

É de notar que o aumento do grau de cristalinidade pode ser explicado pelo menor tamanho das moléculas, que permite uma maior organização e compactação em estruturas cristalinas. Este efeito no grau de cristalinidade explica o aumento do módulo de elasticidade [126].

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

4.1. METODOLOGIA DE ANÁLISE

A definição da metodologia de análise das não conformidades teve como objetivo definir qual o procedimento de identificação das suas causas, quais as ações corretivas a serem tomadas e quais os critérios para, numa fase posterior, se proceder à esquematização das ações. Esta esquematização permitirá uma resolução mais rápida de ocorrências futuras da não conformidade analisada.

Posto isto, a metodologia adotada possui quatro fases de funcionamento.

Fase 1

Numa fase inicial analisaram-se, com recurso a ferramentas de qualidade, como por exemplo, diagramas de *Pareto*, as reclamações recebidas pela empresa. Esta análise teve como objetivo identificar as não conformidades que geram as maiores quantidades de material fora de especificação, uma vez que esta identificação permite compreender o impacto económico associado a cada não conformidade, percebendo assim quais as não conformidades cujo estudo beneficia mais a empresa [127].

Uma vez que a empresa se encontrava a iniciar a produção de folhas em PET, os dados relativos a este produto eram inexistentes, o que significa que as reclamações recebidas pela empresa apenas continham dados relativos à mistura de GPPS/HIPS. Deste modo, numa primeira fase realizar-se-á o levantamento das não conformidades verificadas nas produções de PET a decorrer, sendo, posteriormente, efetuada a investigação.

Fase 2

Na segunda fase da metodologia averiguaram-se as três não conformidades mais críticas definidas na fase anterior, bem como as não conformidades verificadas nas produções de PET, estudando a ciência por detrás de cada não conformidade. Este conhecimento é fulcral na identificação das causas mais comuns que tem como objetivo investigar quais os fatores que mais impacto possuem na origem desta não conformidade. Esta investigação permite restringir previamente os fatores que, maioritariamente, se encontram na origem das não conformidades que se pretendem analisar, permitindo assim uma redução do tempo de identificação e respetiva ação corretiva.

Fase 3

Posteriormente, procedeu-se à esquematização da análise efetuada na fase 2, para a formação do manual presente no Anexo B - que funcionará como forma de apoio à produção. Esta esquematização organiza as causas e as ações corretivas, originando uma sequência que se inicia na causa e respetiva correção, dado que a ação corretiva a ser tomada em primeiro lugar resulta numa ponderação entre a correção mais simples e a causa mais provável, sendo a causa mais provável o fator mais relevante. A simplicidade da solução é um fator relevante neste exercício dado que estas soluções, por norma, são menos morosas e não implicam custos, representando uma mais-valia devido aos prazos de encomenda, mas sobretudo, devido aos elevados débitos do processo de extrusão [28, 29, 31].

Na Figura 25 encontra-se esquematizada a metodologia aplicada na resolução das não conformidades mais críticas.

Fase 4

Na última fase da metodologia definida aplicaram-se todos os passos anteriores a casos de estudo, sendo estes provenientes de reclamações recebidas cujo fundamento eram as não conformidades em questão. Estes casos de estudo tiveram como objetivo a aplicação da análise das fases anteriores a casos reais, verificando a sua aplicabilidade em ambiente industrial.

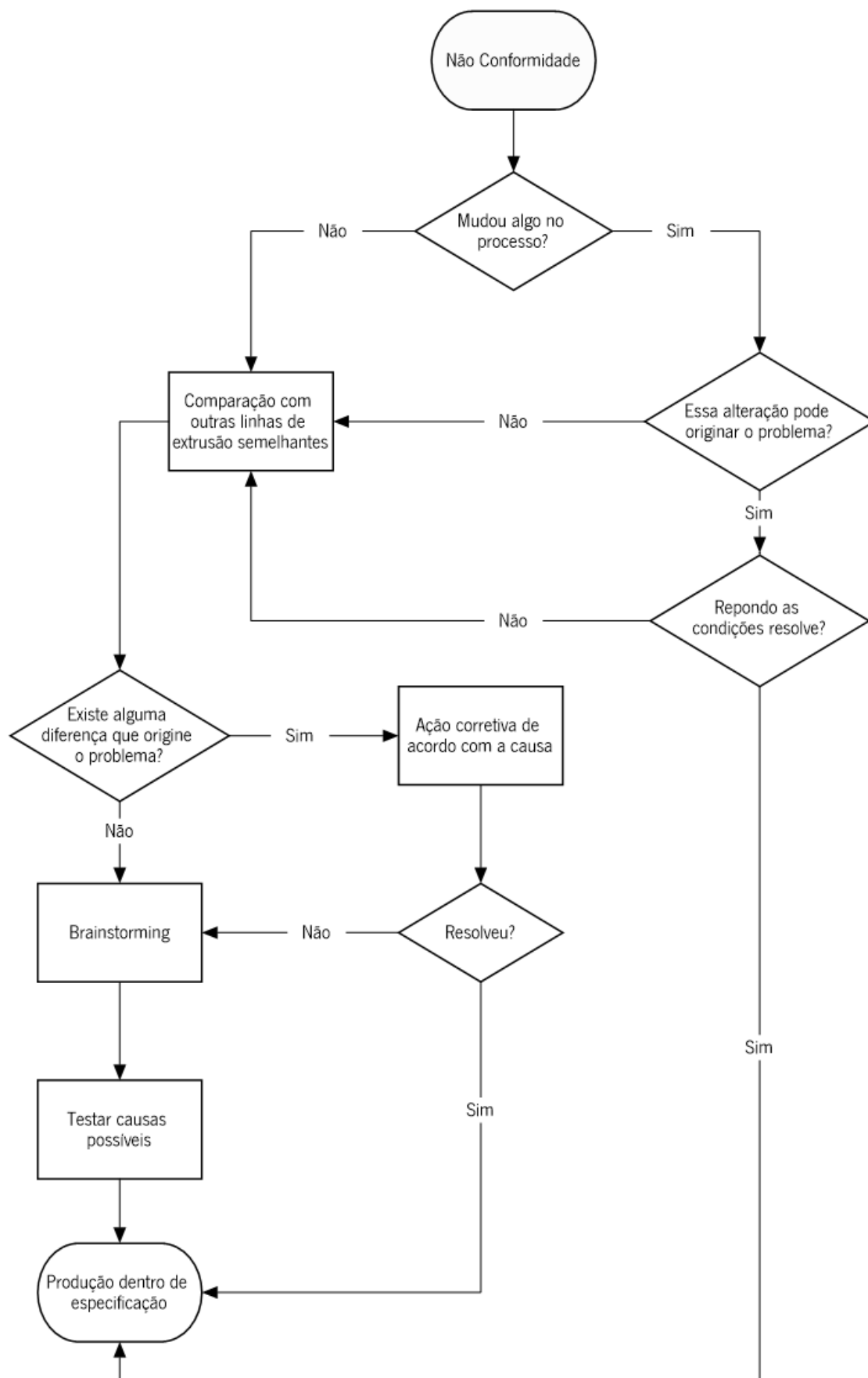


Figura 25 - Metodologia aplicada na resolução das não conformidades mais críticas.

4.2. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

4.2.1. MEDIÇÃO DA BIRREFRINGÊNCIA (COMPENSADOR DE *Berek*)

A medição da birrefringência tem como objetivo investigar a diferença de orientação molecular entre as zonas analisadas, verificando se este fator é responsável pela(s) não conformidade(s) à(s) qual(ais) se aplicou.

Esta medição baseia-se na avaliação da diferença de índices de refração e não dos valores absolutos, iniciando-se esta medição com a preparação de amostras recorrendo ao micrótomo *Leitz 1404*, através do qual se extraiu uma amostra de quinze micrómetros. Esta preparação deve-se à necessidade de obter uma amostra cuja espessura permita a análise com o compensador de *Berek*.

Posteriormente, a amostra é colocada no microscópio *OLYMPUS BH-2*, onde se utiliza a microscopia de luz polarizada. A Microscopia de Luz Polarizada consiste em polarizar a luz numa única direção, através de um polarizador, posicionado em frente ao condensador, e de um analisador, colocado entre a objetiva e a ocular. Estes dois filtros decompõem o vetor elétrico das ondas luminosas em dois vetores perpendiculares, sendo um deles absorvido e o outro transmitido. Desta forma, quando estes componentes perfazem um ângulo de 90° encontram-se cruzados e existe a extinção da luz acima do analisador. Esta posição denomina-se posição de extinção a partir da qual se roda a platina 45° para a posição de transmissão luminosa máxima.

Uma vez encontrada a posição de transmissão luminosa máxima utiliza-se o compensador de *Berek*. Este compensador consiste numa placa fina de calcite que pode ser inclinada em ambas as direções da posição central, perfazendo uma amplitude de 30° . Esta rotação divide o feixe luminoso em dois, o ordinário e o extraordinário, como ilustrado na Figura 26, entre os quais existe uma diferença de percurso ótico, sendo essa diferença determinada com base no ângulo da rotação.

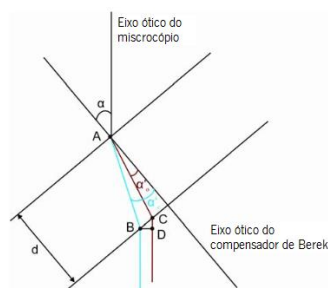


Figura 26 - Funcionamento de um compensador de *Berek*, onde a azul está representado o raio ordinário e a vermelho extraordinário.

Adaptada de [128].

4.2.2. MEDIÇÃO DA CONTRAÇÃO

O teste de contração foi método desenvolvido internamente que teve como objetivo investigar diferentes níveis de orientação molecular na folha, através da obtenção de amostras a partir de zonas estratégicas. Este teste tem por base a formação de amostras com 100 milímetros de espaçamento entre marcas retiradas da folha que se deseja testar, como representado na Figura 27.

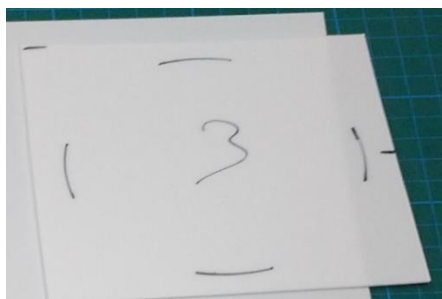


Figura 27 - Exemplo de uma amostra utilizada no teste de contração.

Recorrendo ao equipamento *Thermo Haake W26* estas amostras são mergulhadas num banho a $152 \pm 3^\circ\text{C}$ durante 10 minutos e, após o seu arrefecimento, efetua-se a medição da distância entre marcas, comparando com os valores obtidos anteriormente. Posteriormente, recorre-se à equação (1) para determinar a percentagem de contração da amostra.

$$C = \frac{L_0 - L}{L_0} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Onde L_0 e L são, respetivamente, a dimensão inicial da amostra e a dimensão após a realização do ensaio.

4.2.3. CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARRIMENTO (DSC)

A calorimetria diferencial de varrimento tem por base o aquecimento de um material de referência a uma taxa de transferência de calor constante, que não sofre qualquer transição à temperatura da medição e cujas propriedades térmicas são conhecidas, bem como de uma amostra a testar. Esta comparação permite determinar a temperatura das várias transições cada folha, bem o grau de cristalinidade através da equação (2).

$$X_{c,h} = \frac{\Delta H_{fus}}{\Delta H_{fus,c}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

Onde ΔH_{fus} e $\Delta H_{fus,c}$ são, respectivamente, a entalpia de fusão da amostra e a entalpia de fusão do PET totalmente cristalino (117 J/g) [129, 130].

Esta técnica de caracterização teve como objetivo investigar o impacto das temperaturas dos cilindros da calandra no grau de cristalinidade da folha de PET e, consequentemente, na perda de transparência. Efetuou-se esta investigação recorrendo ao equipamento *Perkin Elmer DSC7* calibrado para uma taxa de arrefecimento de 10°C/min. Esta técnica foi efetuada com recurso ao conjunto de normas ISO 11357-1:2016, ISO 11357-2:2020 e ISO 11357-2:2020.

4.2.4. MEDIÇÃO DA TRANSMITÂNCIA LUMINOSA (TURBIDEZ)

A medição da transmitância luminosa (turbidez) é uma técnica de caracterização que tem por base o rácio entre a luz transmitida por um corpo e a luz nele incidente, ou seja, entre a transmitância luminosa difusa (T_0) e a transmitância luminosa total (T_T), como demonstrado na equação (3). Esta medição teve como objetivo investigar o efeito temperatura das calandras na transparência, dado que a turbidez é um dos seus dois parâmetros que se relaciona com a perda de contraste da imagem, bem como o efeito do *antiblock* nesse mesmo atributo.

$$\text{Transmitância (\%)} = \frac{\text{Transmitância Luminosa Difusa}}{\text{Transmitância Luminosa Total}} \times 100 \quad (3)$$

Recorrendo ao medidor de turbidez *BYK Gardner* modelo XL-211A, mediu-se a transmitância das folhas de PET em cinco zonas, ilustradas na Figura 28, sendo esta técnica de caracterização efetuada segundo a norma ASTM D 1003-1961.

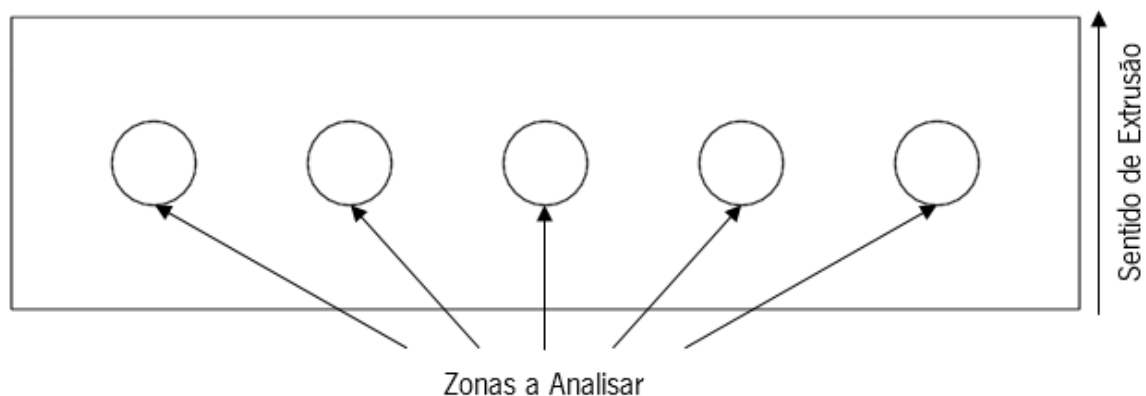


Figura 28 - Zonas onde se efetuou a análise da transmitância luminosa das folhas.

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DAS NÃO CONFORMIDADES

5.1. NÃO CONFORMIDADES RELATIVAS À MISTURA GPPS/HIPS

Como definido na metodologia apresentada, iniciou-se o estudo das não conformidades pela análise das reclamações recebidas pela Intraplás S. A. desde 2017. Desta análise excluíram-se não conformidades cuja origem é atribuída ao cliente, como por exemplo, manuseamento incorreto, defeitos nas máquinas do cliente que causam a não conformidade, entre outros. De igual modo, excluíram-se as reclamações cuja não conformidade recaiu numa categoria interna designada "outros (extrusão)". Estas exclusões devem-se ao facto de a Intraplás S. A. não ser responsável pelo problema, como explicitado, e ao facto de a categoria "outros (extrusão)" ser demasiado abrangente para ser possível efetuar uma análise correta às não conformidades, respetivamente.

Posto isto, efetuou-se a análise das reclamações, atribuindo uma maior importância à quantidade de material fora de especificação, como definido na metodologia de análise explicitada na secção 4.1. Recorrendo aos dados provenientes desta análise formulou-se o diagrama de *Pareto* apresentado na Figura 29.

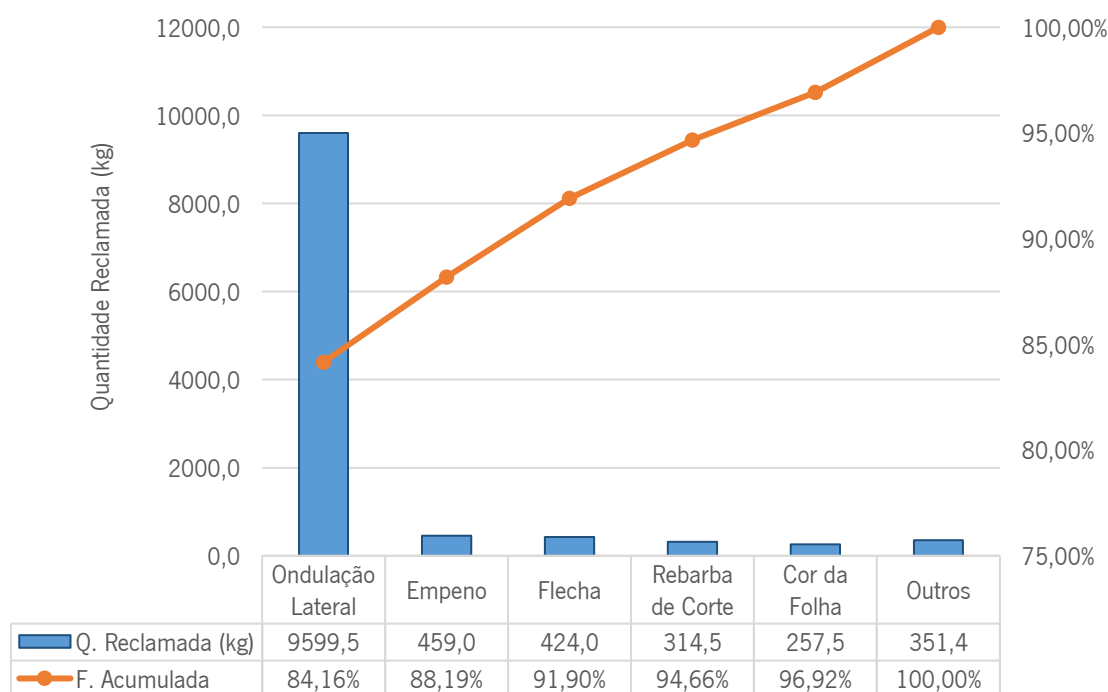


Figura 29 - Diagrama de *Pareto* da análise efetuada às reclamações.

Analisando o diagrama é possível verificar que a não conformidade onde a quantidade de material reclamado é superior é na ondulação lateral. Esta quantidade é bastante superior às restantes,

representando 84,16% da quantidade reclamada total, o que indica que esta não conformidade requiere uma maior reflexão no momento do seu estudo. As não conformidades responsáveis por maior quantidade de material incumpridor de especificação após a ondulação lateral são o empeno e a flecha, que representam 4,02% e 3,72% da quantidade reclamada, respectivamente.

É de notar a existência de uma categoria denominada “outros” no diagrama resultante da análise referida, onde se encontram inseridas as não conformidades pontuais cuja quantidade era demasiado reduzida para justificarem um estudo aprofundado.

5.1.1. ONDULAÇÕES

A ondulação é uma não conformidade que se manifesta nas extremidades da folha, como forma de compensar a maior dimensão longitudinal desta zona comparativamente ao centro da bobine [50, 131].

Na Figura 30 encontra-se exposto um exemplo desta não conformidade.

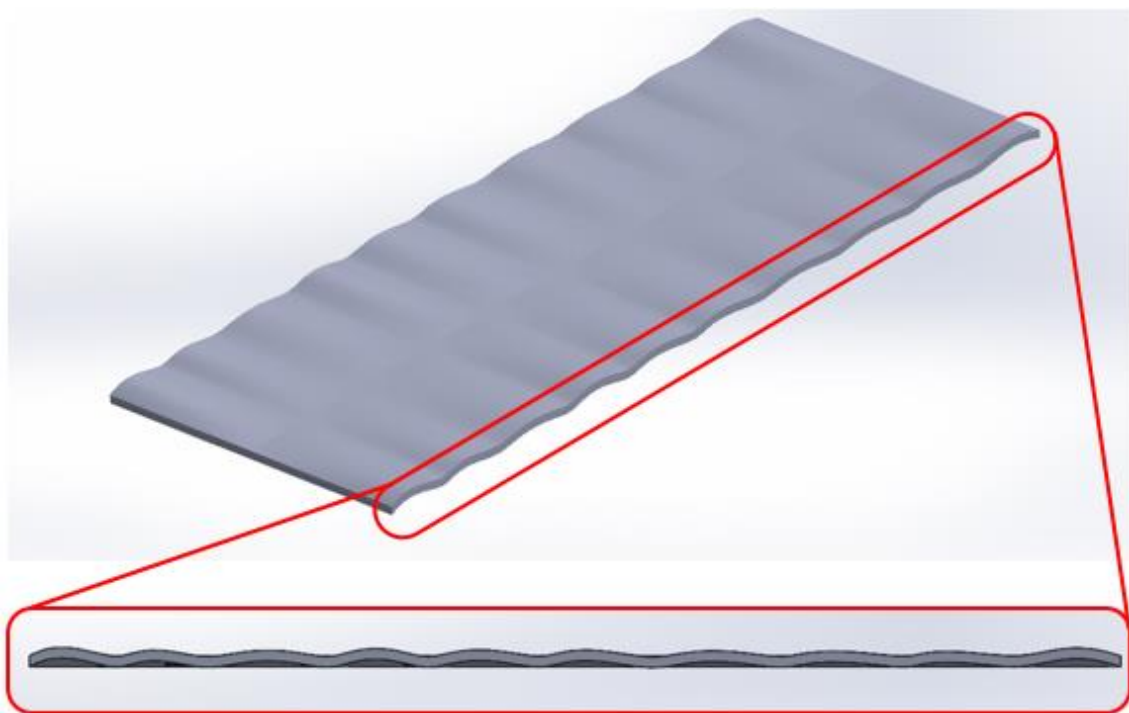


Figura 30 - Representação 3D duma folha com ondulação lateral.

Esta não conformidade causa um problema do ponto de vista da termoformação devido à incorreta indexação da folha, ou seja, à medida que a folha se move ao longo da máquina *form-fill-seal*

que faz a enformação, enchimento e selagem do copo, o passo definido previamente não é cumprido, devido ao facto de, na movimentação entre estações, a folha se elevar ligeiramente devido à ondulação que esta possui, como se encontra ilustrado na Figura 31. Esta ligeira elevação impede a correta deslocação da folha entre estações, levando ao desposicionamento da mesma [132].

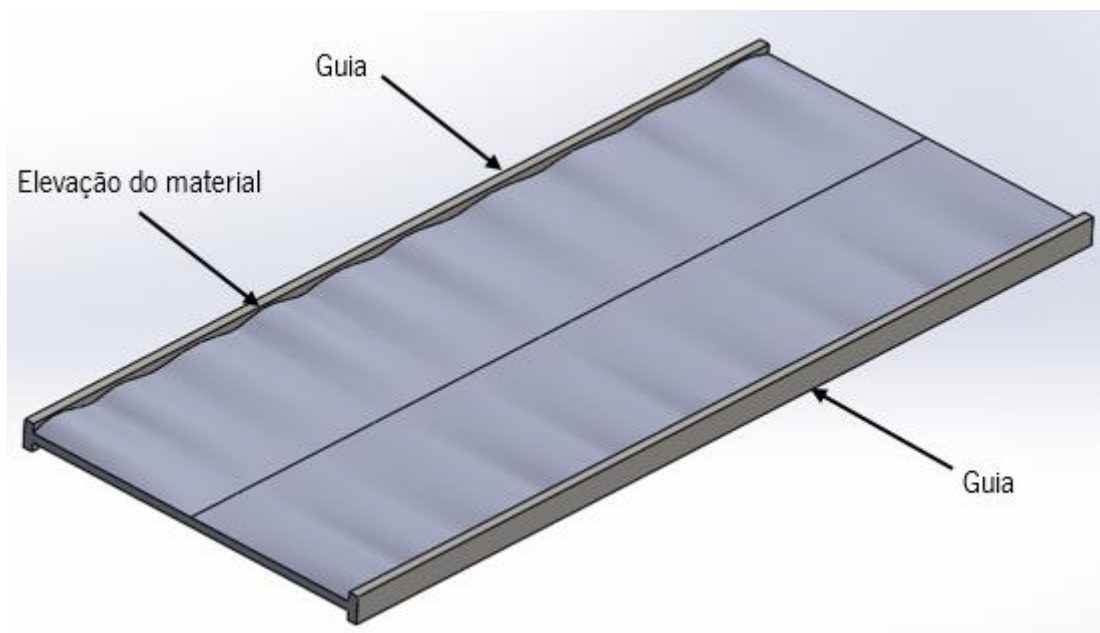


Figura 31 - Representação da elevação do material na termoformadora causada pela ondulação da folha.

O deslocamento incorreto apresenta-se como um problema mais crítico quando o aquecimento ocorre por aquecedores alveolares, como os que se encontram demonstrados na Figura 32, em comparação com os aquecedores por infravermelhos que aquecem a folha na totalidade, dado que estes apenas fornecem calor às zonas em que se pretende formar.



Figura 32 - Aquecedores alveolares utilizados nas máquinas de *form-fill-seal*.

O aquecimento seletivo, aliado ao deslocamento incorreto, vai originar problemas do ponto de vista do processamento, uma vez que a zona aquecida não se encontra totalmente centrada na zona a formar, produzindo um copo com diferenças de espessura superiores ao esperado, colocando em risco

o seu desempenho mecânico. Em casos extremos esta não conformidade pode dar origem ao rompimento do copo no momento da formação, como demonstrado na Figura 33 [132].

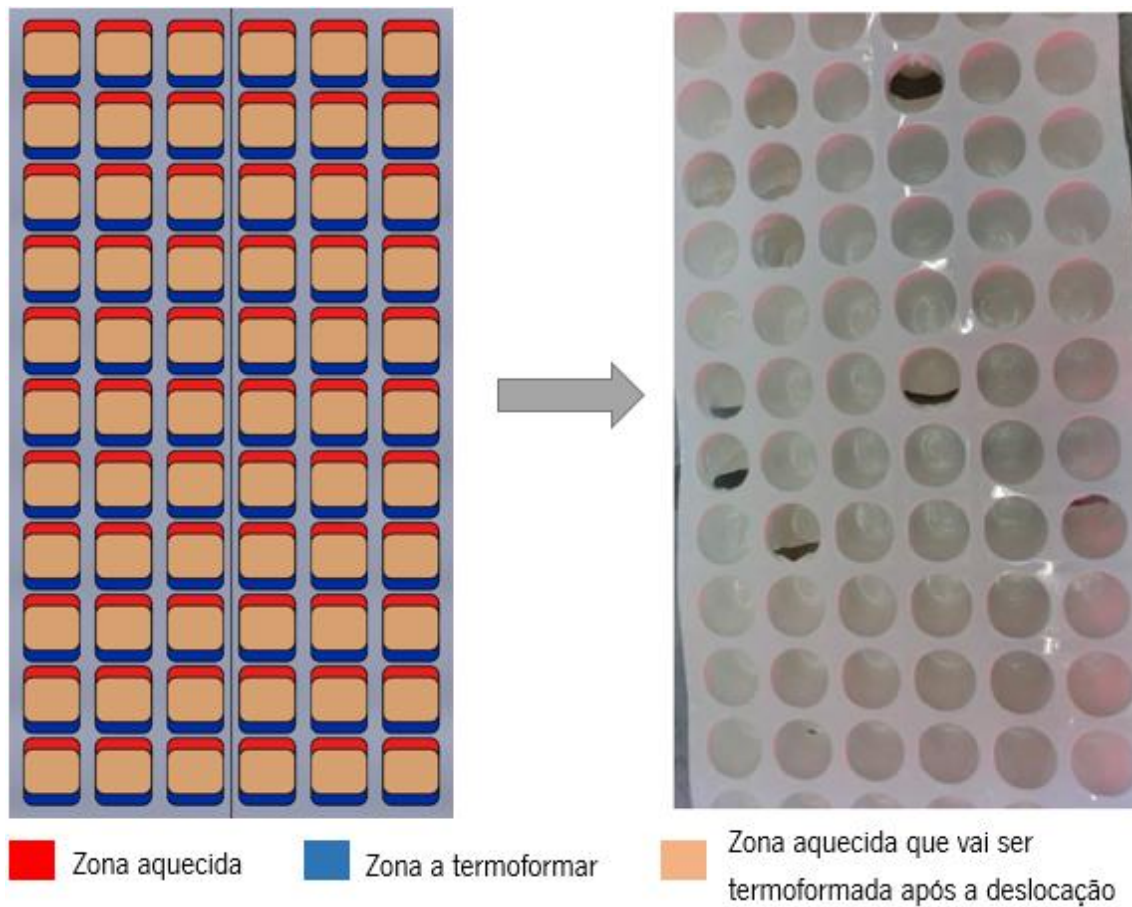


Figura 33 - Resultado da deslocação da zona aquecida na termoformação.

Na Figura 34 encontra-se um resumo sob a forma de um esquema dos problemas causados pela ondulação na fase de aquecimento.

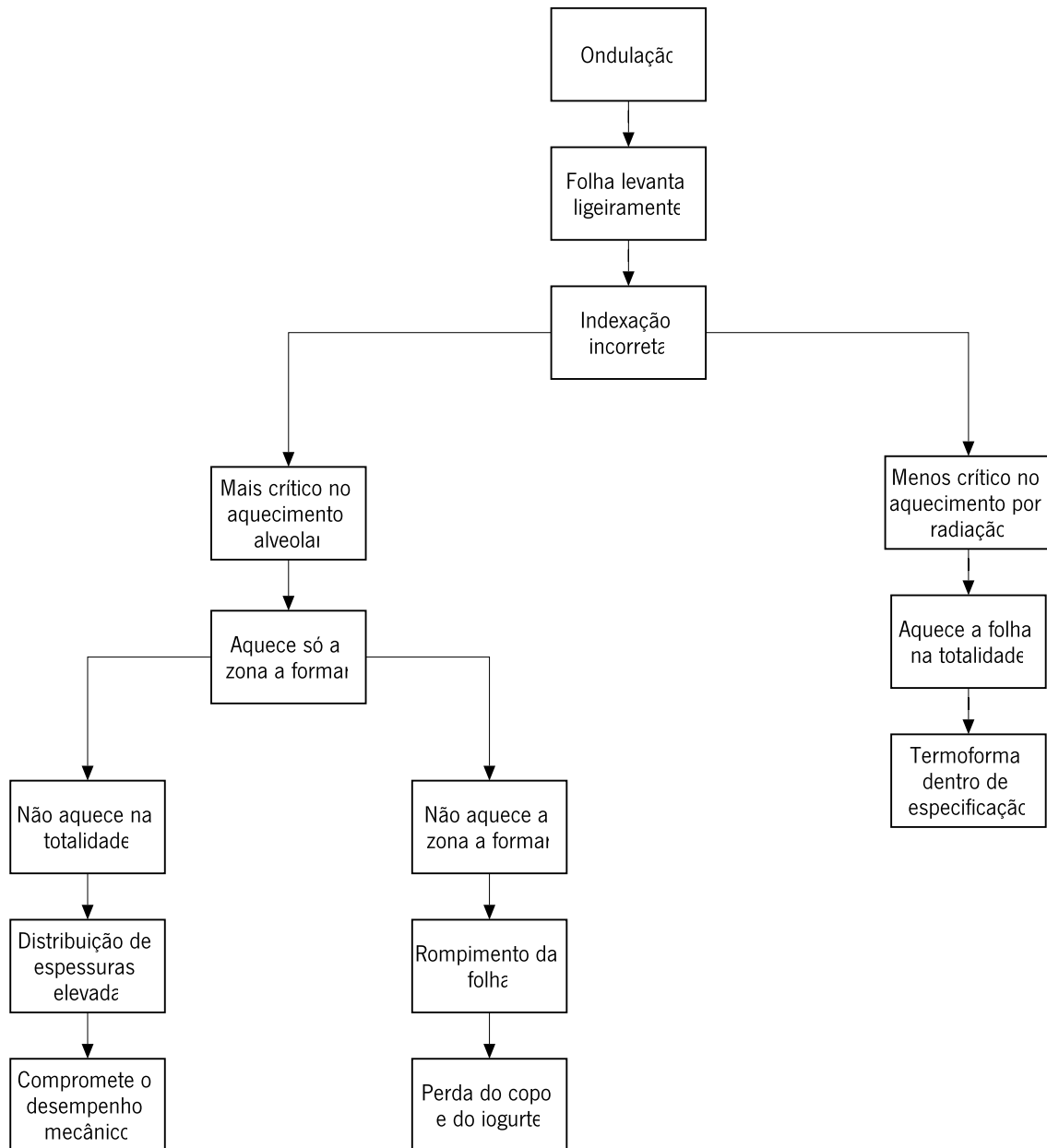


Figura 34 - Problemas causados pela ondulação na fase de aquecimento da termoformação.

A ondulação pode ainda originar problemas ao nível da selagem do copo, pelas razões apresentadas anteriormente, ou seja, o deslocamento incorreto provoca um posicionamento incorreto do copo na estação de selagem. Este posicionamento incorreto pode originar uma soldadura incompleta da tampa, o que permite que o ar contacte com o iogurte, inviabilizando o seu consumo.

5.1.1.1. MEDIÇÃO

A medição da ondulação lateral efetua-se por meio de um teste interno, no qual se extrude uma bobine de amostra, denominada cabeça, que ficará a repousar por um tempo determinado.

De seguida, retira-se uma amostra de dois metros da zona onde esta não conformidade apresenta uma maior tendência para se manifestar, ou seja, junto ao rolo de cartão do cabeça. Isto deve-se ao facto de no início da bobinagem, ou seja, junto ao rolo de cartão, ser necessário aplicar uma maior força como forma de ultrapassar a inércia que o mandril apresenta, sendo que, após ultrapassar a inércia inicial, a força aplicada é reduzida, como demonstrado na Figura 35, bem como nas figuras presentes no Anexo C -.

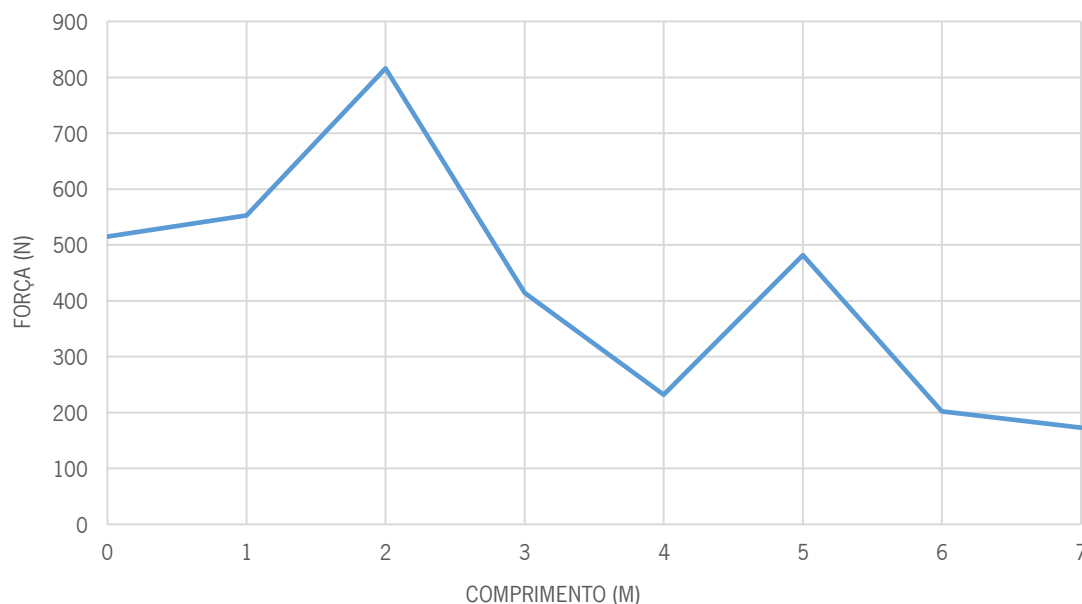


Figura 35 - Variação da força aplicada consoante o comprimento de folha bobinada.

Posteriormente, as duas extremidades dessa amostra são alinhadas por uma linha paralela à direção de extrusão, de forma a prevenir ondulações causadas por um desalinhamento da amostra no momento da medição. Posto isto, efetua-se a contagem do número de ondulações (n) nos dois metros de amostra e, como forma de verificar qual a ondulação máxima, mede-se a ondulação que apresenta a altura mais acentuada (h). É de notar que a medição desta não conformidade inicia-se por uma zona onde esta não se verifique, ou seja, que contacte com a superfície em que repousa. Este método encontra-se explicitado na Figura 36 e Figura 37.

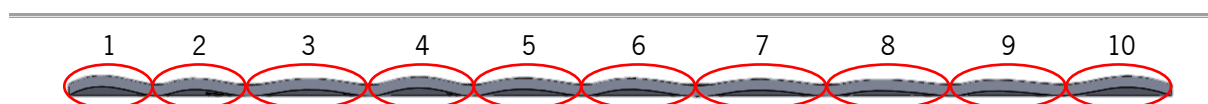


Figura 36 - Representação da contagem de ondulações presentes na amostra

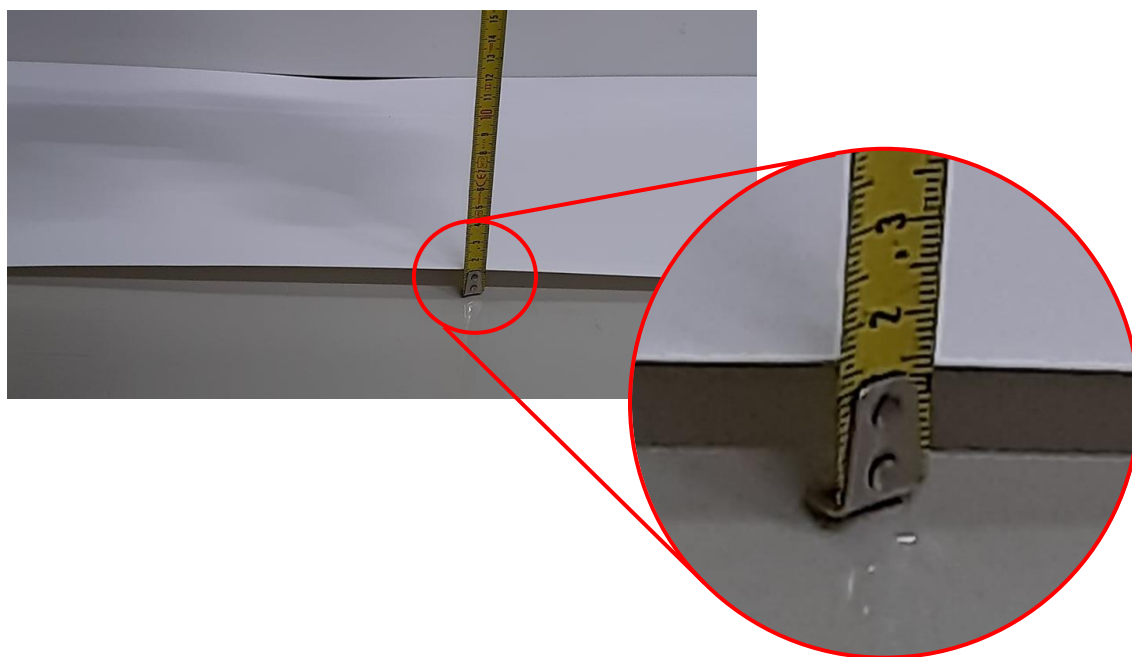


Figura 37 - Exemplificação da altura mais acentuada na medição de ondulações.

De seguida, verifica-se se a amostra se encontra dentro de especificação. Para tal, efetua-se a multiplicação do número de ondulações (n) pela ondulação mais acentuada (h). Recorrendo ao exemplo apresentado nas Figura 36 e Figura 37, bem como a uma especificação típica desta não conformidade (quarenta), obtém-se, pelo método descrito, o resultado apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Exemplificação duma tomada de decisão relativa à medição da ondulação lateral.

Não Uniformidade	Especificação		Decisão	
	Definida	Obtida	Positiva	Negativa
Ondulação Lateral ($OL = n \times h$)	≤ 40	$10 \times 14 = 140$		✓

5.1.1.2. CAUSAS

Numa fase inicial ponderou-se que a causa seria uma sobrecompensação dos fluxos na fieira, resultando na presença de uma maior quantidade de material nas extremidades comparativamente ao centro. Contudo, após a visualização de um arranque de produção verificou-se que o material flui mais

na zona central, como demonstrado na Figura 38, o que indica que não existe uma sobrecompensação, levando a uma análise mais aprofundada.



Figura 38 - Arranque de máquina.

Desta forma, investigou-se quais as possíveis causas desta maior dimensão das extremidades. Esta investigação revelou que existem quatro causas principais para a formação desta não conformidade, que se encontram apresentadas no diagrama de *Ishikawa* exposto na Figura 39.

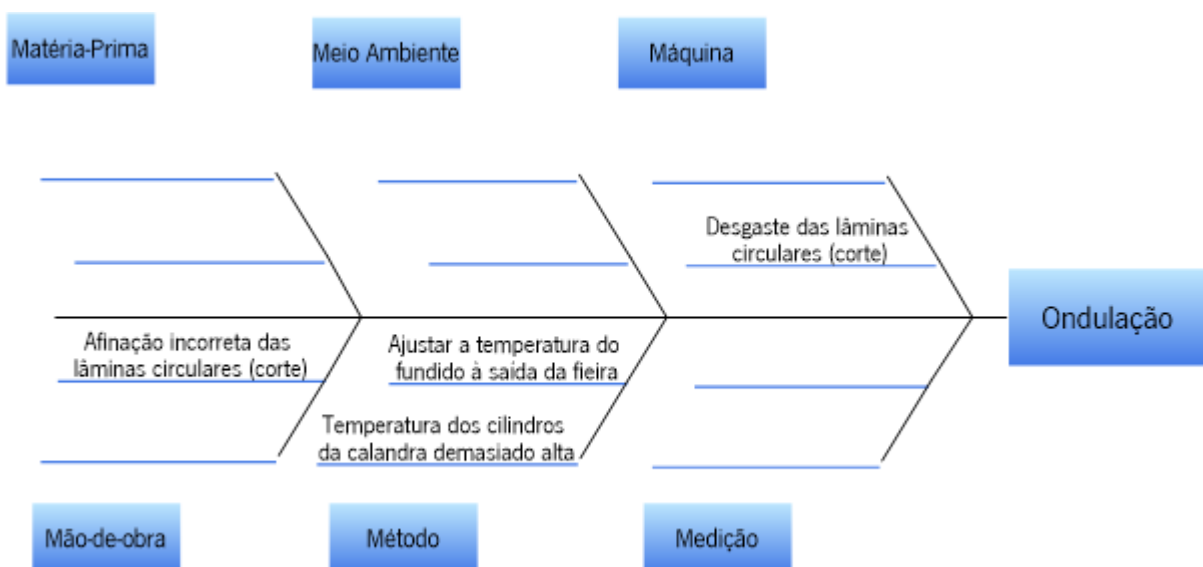


Figura 39 - Diagrama de *Ishikawa* referente à não conformidade em questão.

Ajustar a temperatura do fundido à saída da fieira: A existência de diferentes temperaturas no fundido gera diferentes níveis de viscosidade e de fluência quando este é exposto a um estiramento uniforme, como é promovido pelos rolos de puxo, podendo levar ao aparecimento de ondulação.

Este fenómeno ocorre quando um fundido apresenta maior temperatura no centro que nas extremidades, ocorrendo nestes casos primeiro a solidificação das extremidades e, posteriormente, solidificação do centro da folha. Esta diferença entre tempos de arrefecimento até uma temperatura onde não exista mobilidade molecular leva a que o centro tenha mais tempo para contrair e, como tal, apresenta uma menor dimensão em relação às extremidades. Este facto causa a ondulação da(s) extremidade(s) para se compensar a menor dimensão do centro. O efeito descrito encontra-se ilustrado na Figura 40, onde se considerou que o material utilizado era poliestireno.

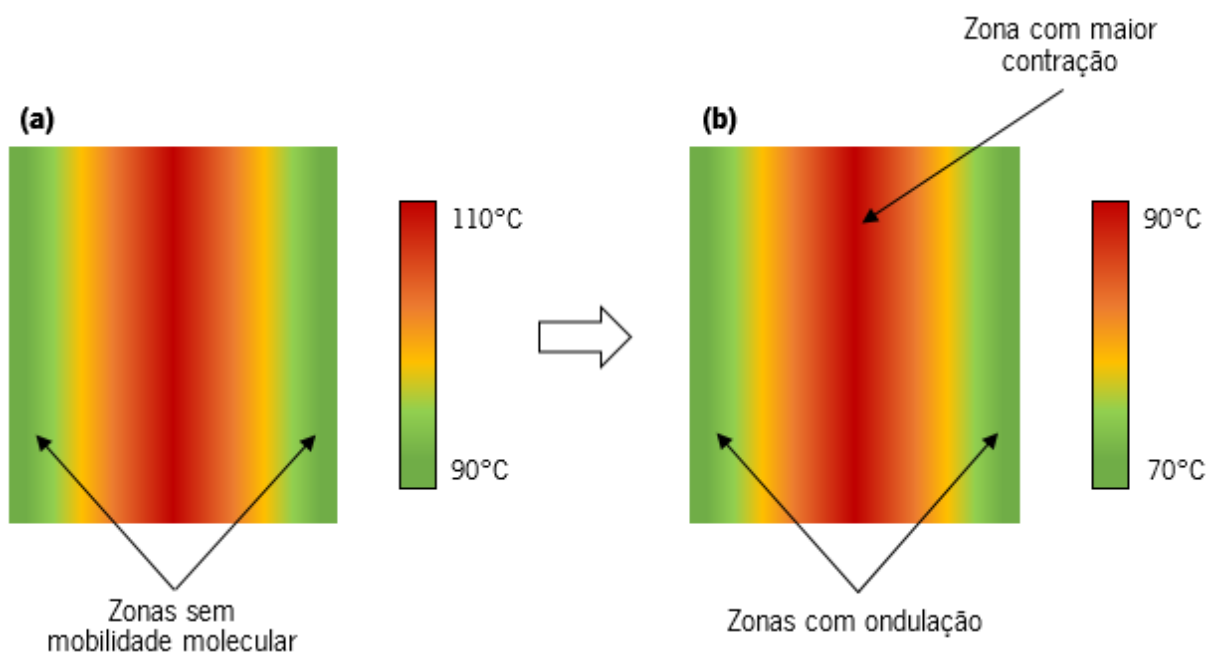


Figura 40 - Representação do efeito de uma temperatura do fundido não uniforme, onde em (a) ocorre a solidificação das extremidades e em (b) a solidificação do centro.

Temperatura dos cilindros da calandra demasiado alta: A bobinagem da folha quando esta ainda se encontra a temperaturas elevadas potencia o aparecimento de ondulação em ambas as extremidades laterais da bobine. Isto deve-se ao facto de o arrefecimento da bobine não ser uniforme, dado que a zona lateral da bobine promove uma maior transferência de calor com o meio ambiente que o núcleo, resultando em diferentes taxas de arrefecimento [131, 133]. Isto ocorre devido à reduzida condutividade térmica dos polímeros que impede uma uniformidade da temperatura, impedindo que a

energia que se encontra no centro da folha sob a forma de calor seja transferida para as extremidades e, seguidamente, para o meio ambiente.

Tal como no caso anterior, a maior taxa de arrefecimento na zona lateral da bobine significa que esta solidificará primeiro que o núcleo, onde os níveis de contração serão mais elevados.

Desgaste das lâminas circulares (corte): A utilização de lâminas circulares desgastadas pode estar na origem de ondulações, uma vez que durante o corte das extremidades laterais da folha, esta prende na lâmina, encontrando-se sob tensão, sendo essa tensão libertada quando a folha se liberta. Por norma, quando este fator está na origem das ondulações estas apenas se verificam na extremidade onde a lâmina problemática se encontra.

Afinação incorreta das lâminas circulares (corte): Uma afinação incorreta das lâminas circulares têm um efeito semelhante ao explicitado para o desgaste das mesmas, uma vez que não origina um corte limpo. Isto deve-se ao facto de a lâmina não penetrar corretamente a folha, causando o seu estiramento previamente ao corte. Uma vez que este estiramento acontece a uma temperatura abaixo de T_g , deformação provocada na folha é permanente, levando à formação da não conformidade apenas na extremidade onde a lâmina com a afinação incorreta se encontra. Na Figura 41 encontra-se este fenómeno.

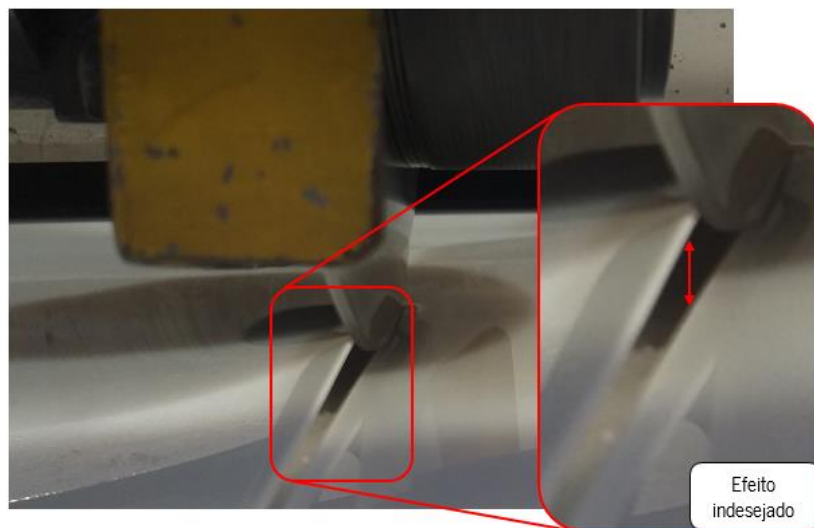


Figura 41 - Representação da criação de ondulação pela lâmina de corte.

5.1.1.3. AÇÕES CORRETIVAS

Terminada a explicitação das causas mais comuns desta não conformidade, procedeu-se à sequenciação das respetivas ações corretivas. Como supramencionado, a ação corretiva a ser tomada em primeiro lugar deve ser uma ponderação entre a correção mais simples e a causa mais provável, resultando essa ponderação na sequência de ações apresentada.

1. Verificar o processo de corte das tiras laterais.

- Deve-se investigar o estado das lâminas de corte, bem como a sua afinação.

2. Verificar a temperatura do fundido à saída da fieira.

- Esta verificação pode ser efetuada com recurso a uma câmara termográfica, sendo que caso se verifique uma disparidade nas temperaturas apresentadas pelo fundido esta deve ser corrigida através das temperaturas da fieira.

3. Reduzir as temperaturas da calandra.

- Esta redução previne o arrefecimento livre da folha e o aparecimento de ondulação fruto de diferentes orientações.

4. Reduzir velocidade linear da linha.

- Esta ação promove o tempo de contacto com cilindros, tornando o arrefecimento mais eficaz, o que se traduz numa menor contração livre do material na bobine. Contudo, esta ação reduz o débito da linha, o que é indesejável do ponto de vista industrial.

5.1.1.4. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

A validação experimental tem como intuito comprovar as possíveis causas apontadas para esta não conformidade através de métodos científicos. Desta forma, iniciou-se esta validação pela verificação da temperatura do fundido à saída da fieira uma vez que é, da sequência de ações corretivas apresentadas, a primeira onde é possível iniciar esta validação. Isto deve-se ao facto de não ser possível investigar a afinação das lâminas de corte por motivos de segurança.

A verificação da temperatura do fundido à saída da feira foi efetuada no decorrer da produção de uma folha da mistura de GPPS/HIPS. A medição efetuada com recurso à câmara termográfica *Testo 869* encontra-se exposta na Figura 42 e na Figura 43.

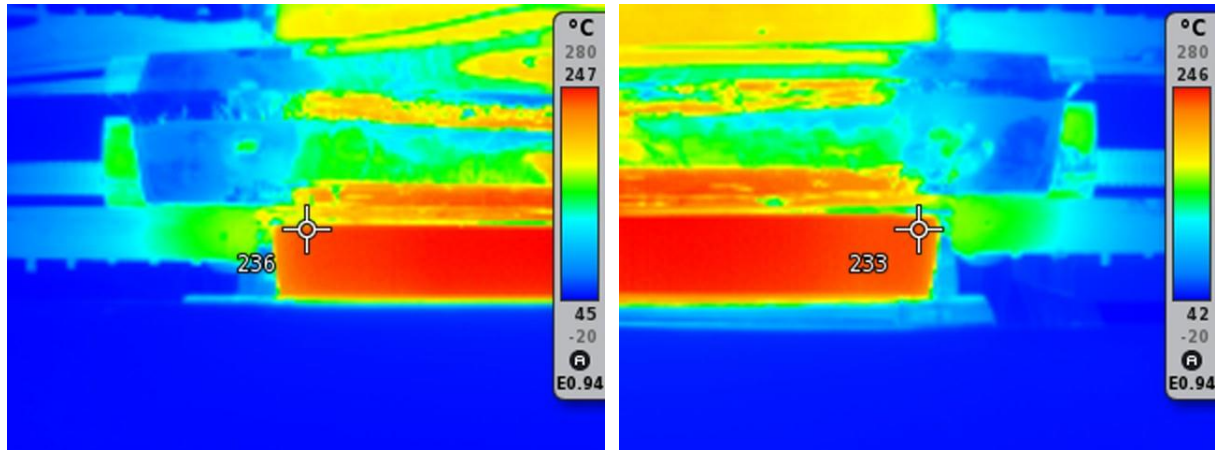


Figura 42 - Temperatura das extremidades da folha à saída da feira.

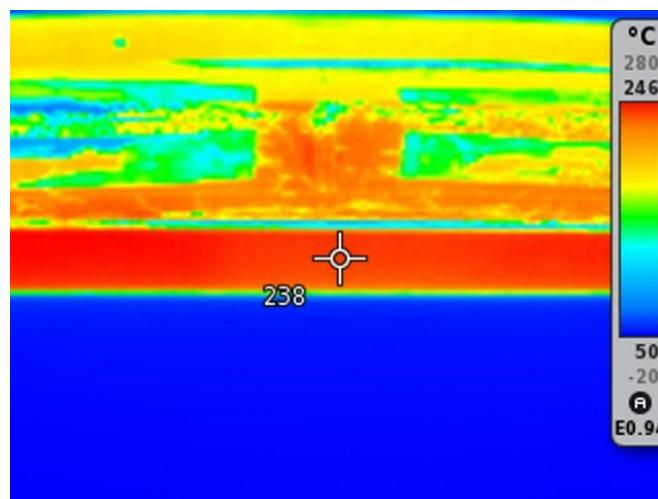


Figura 43 - Temperatura do centro da folha à saída da feira.

Como se pode observar, existem diferentes temperaturas no fundido à saída da feira o que pode explicar o aparecimento de ondulação lateral na folha em questão. Uma vez que esta diferença de temperatura pode impactar o arrefecimento da folha, procedeu-se à averiguação da temperatura durante o arrefecimento.

Esta verificação deve ser efetuada quando, durante o controlo periódico de qualidade, se constatar a existência de ondulação, independentemente da existência de uma diferença de temperatura na feira. Na Figura 44 e na Figura 45 encontra-se explicitada a temperatura da folha medida aquando da sua passagem no cilindro três da calandra.

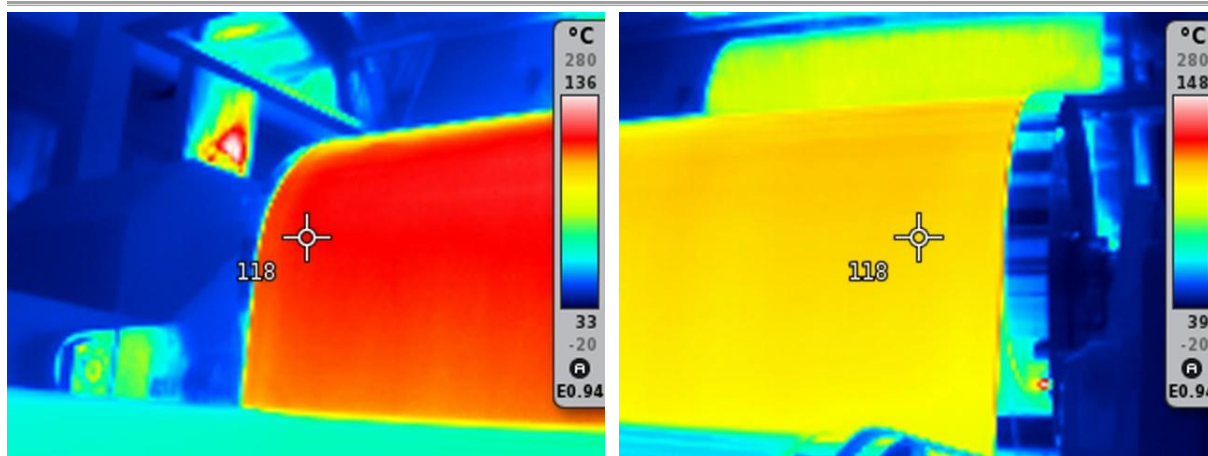


Figura 44 - Temperatura das extremidades da folha na fase de arrefecimento.

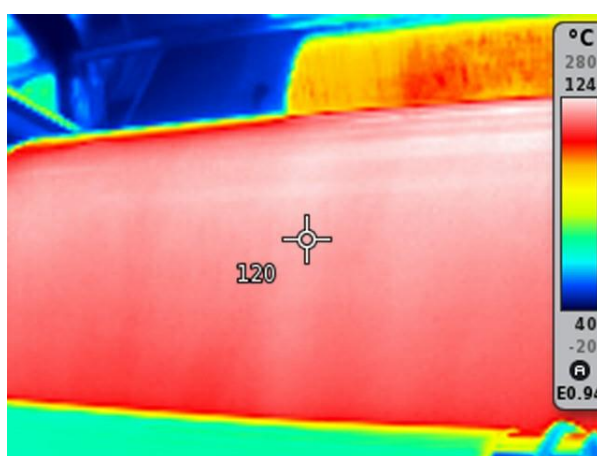


Figura 45 - Temperatura do centro da folha na fase de arrefecimento.

Como se pode verificar nas imagens acima, as extremidades registam uma menor temperatura que o centro, sendo esta a causa apontada para a presença de ondulação.

Posto isto, procurou-se medir a orientação molecular nas duas zonas críticas da folha, nomeadamente, o centro e as extremidades, através da técnica de birrefringência com compensador de *Berek*. Como tal, efetuou-se a análise com recurso a microscopia de luz polarizada de amostras previamente preparadas de uma folha com ondulação, sendo estas retiradas na direção da extrusão. Os resultados referentes a cada uma das zonas a estudar encontram-se expostos na Figura 46.

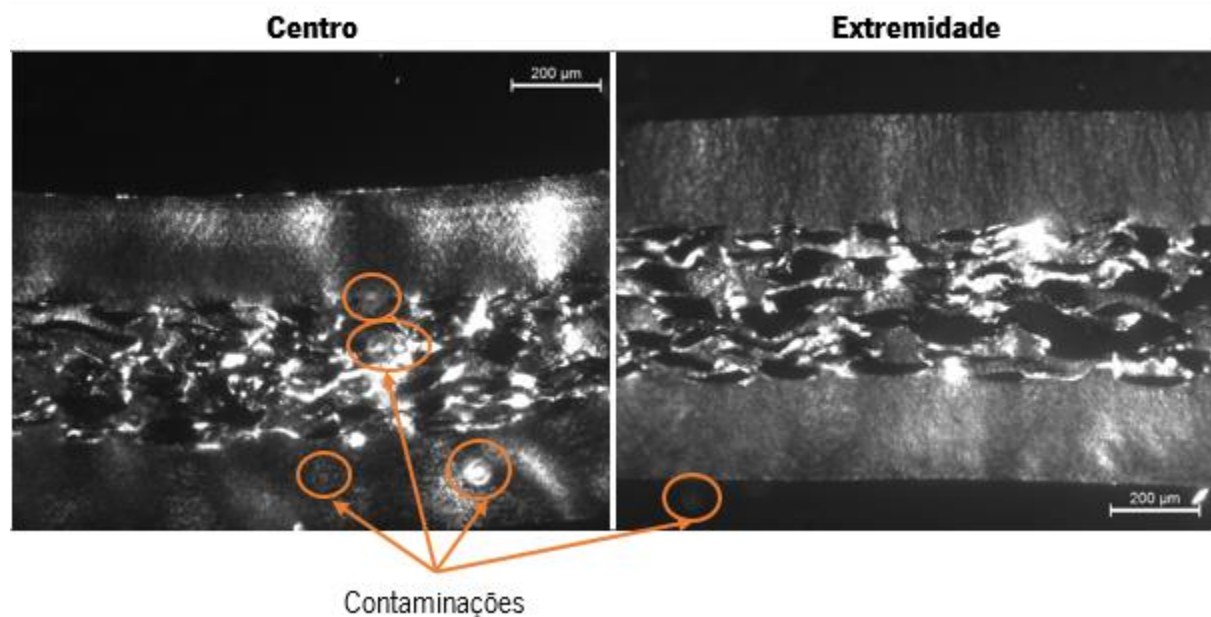


Figura 46 - Corte lateral da folha da mistura de GPPS/HIPS observado ao microscópio com uma ampliação de 10 na objetiva e 1.67 na câmara do mesmo.

Como pode ser verificada na Figura 46, não existem diferenças significativas de orientação entre as duas faces de ambas as amostras, o que impossibilitou a medição da orientação molecular por esta técnica, uma vez que não era possível fixar dois pontos para a medição. É de notar que em ambas as amostras se visualizam contaminações provenientes do microscópio utilizado, bem como ar aprisionado na amostra. É possível verificar também que existem zonas que aparentam possuir um certo nível de orientação diferente do restante da amostra, nomeadamente, as zonas onde a luminosidade é superior.

Contudo, esta orientação é artificial, sendo imposta no momento da preparação da amostra pela faca de corte, escondendo a orientação natural da extrusão e inviabilizando a análise desejada. Isto deve-se ao facto de a faca, no momento do corte, criar microfissuras na superfície do poliestireno devido ao comportamento frágil que este apresenta. O efeito descrito encontra-se apresentado na Figura 47, onde a ampliação do efeito descrito foi capturada com microscopia de campo claro. As figuras completas encontram-se no Anexo D -.

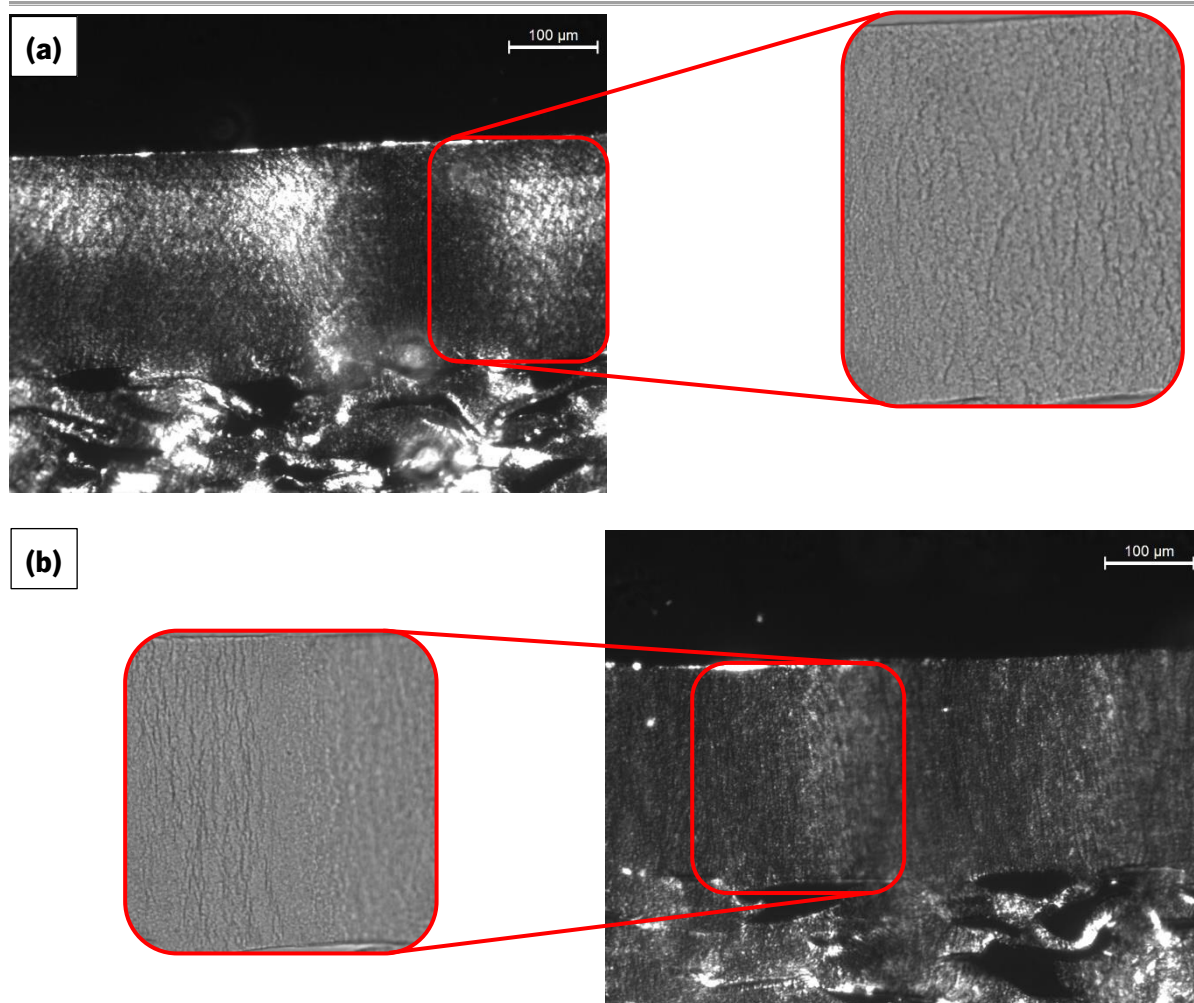


Figura 47 – Pormenor das microfissuras da mistura de GPPS/HIPS observado ao microscópio com uma ampliação de 20 na objetiva e 1.67 na câmara do mesmo: (a) centro da folha; (b) extremidade.

Uma vez que a medição da birrefringência do material foi inconclusiva, procurou-se recorrer a um método indireto para determinar os níveis de orientação molecular presentes na folha, isto é, ao método da contração (descrito na secção 4.2.2).

Desta forma, retiraram-se 5 amostras de 3 zonas distintas da folha, consoante apresentado na Figura 48.

De igual modo, retirou-se o mesmo número de amostras, com a mesma configuração, de uma folha com composição e condições de processamento idênticas aquelas que originaram a folha com ondulação, mas que não possui esta não conformidade.

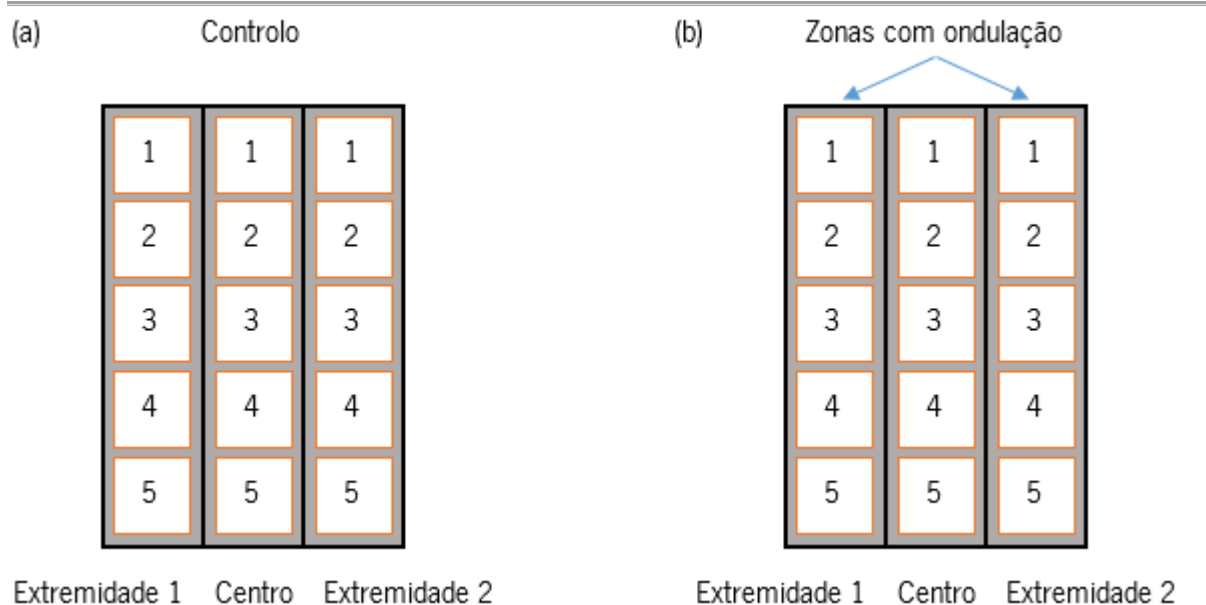


Figura 48 - Explicitação das 3 zonas consideradas e as amostras retiradas das respectivas zonas onde em (a) se trata da folha de controlo e em (b) a folha com ondulação.

Os resultados obtidos para as amostras de controlo, em conjunto com os resultados obtidos para as amostras de material com ondulação, presentes no Anexo E - e no Anexo F -, respetivamente, permitiram a formação de gráficos de comparação dos valores de contração, presentes na Figura 49 e na Figura 50.

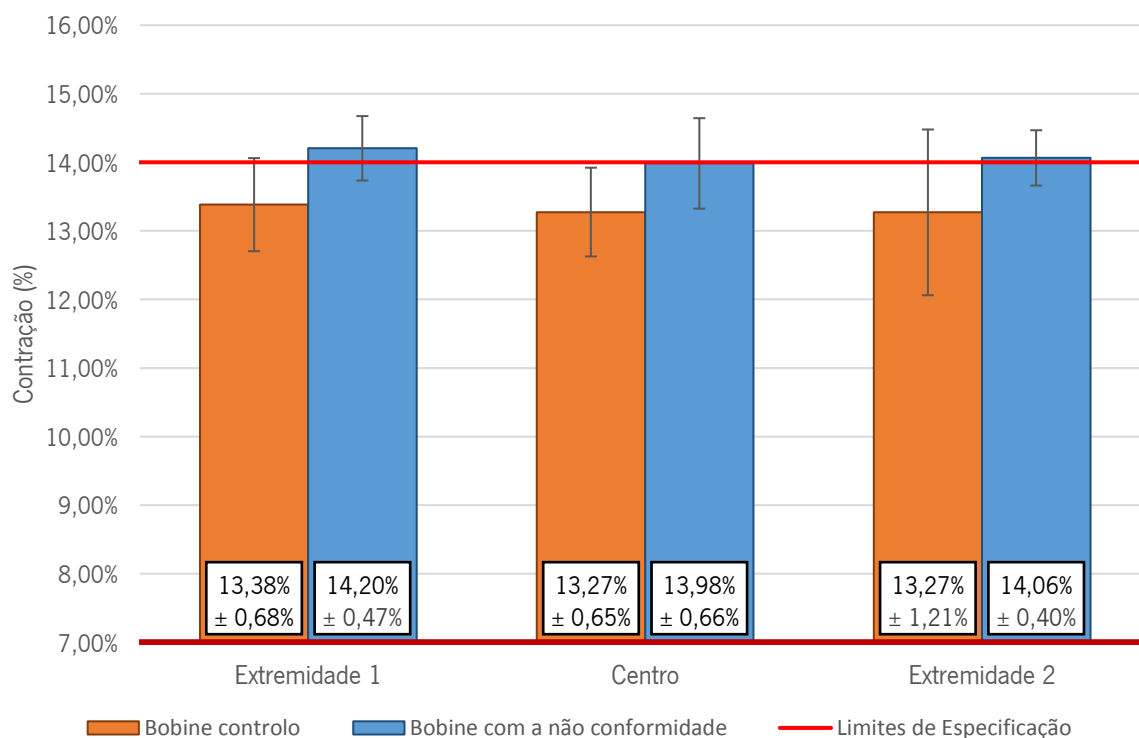


Figura 49 - Valores obtidos no teste da contração para a direção longitudinal das amostras de controlo e de material com ondulação.

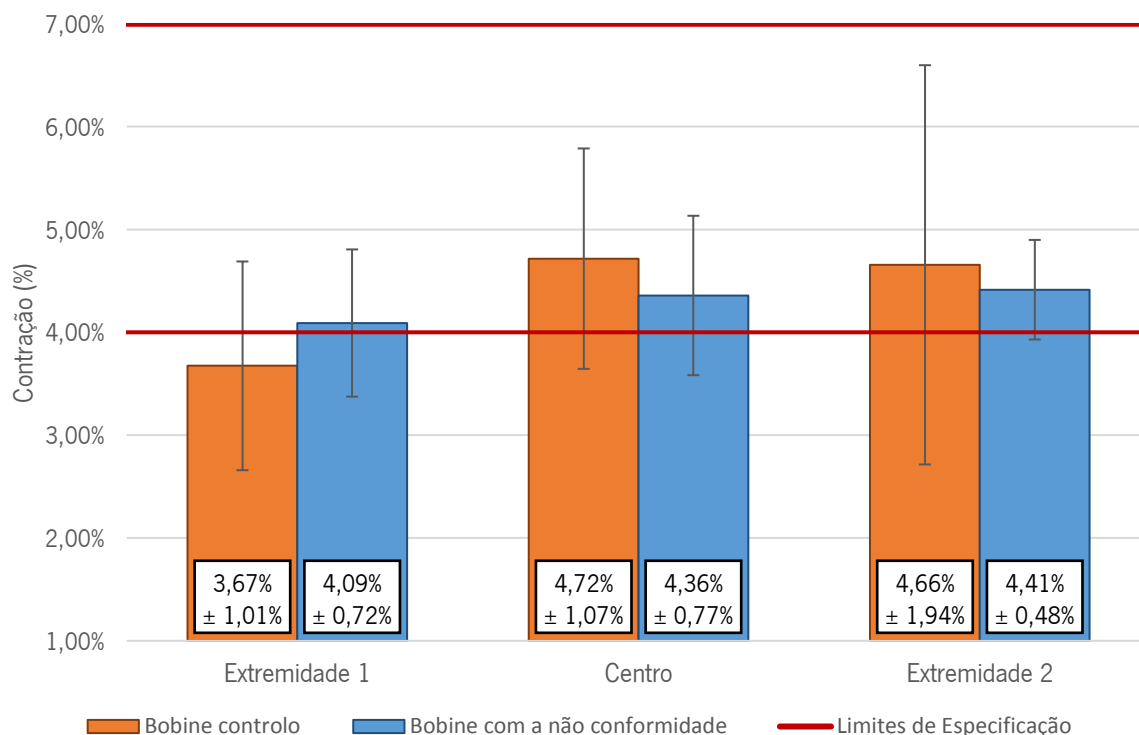


Figura 50 - Valores obtidos no teste da contração para a direção transversal das amostras de controlo e de material com ondulação.

A contração longitudinal da amostra com ondulação apresenta valores superiores aqueles obtidos para a amostra de controlo, chegando a ultrapassar o limite de especificação, o que indica que os níveis de orientação presentes nessa folha são superiores aos da folha de controlo. Uma vez que as condições de processamento e composição são as mesmas para as duas folhas, considera-se que este aumento possa resultar de variações naturais da viscosidade da matéria-prima, o que, neste caso, resultou numa menor viscosidade, permitindo uma maior orientação molecular. Efetuando a comparação entre as zonas de interesse não é possível retirar ilações sobre a causa da ondulação, dado que os valores de contração entre as extremidades e o centro da folha se encontram bastante equiparados, impossibilitando assim afirmar ou descartar a orientação molecular como a causa desta não conformidade sem a utilização de um método direto para efetuar a sua medição.

Relativamente à contração transversal todos os valores da amostra com ondulação encontram-se dentro de especificação, contrariamente ao que se sucede para a amostra de controlo. Contudo, também aqui não se encontram diferenças de contração entre as extremidades e o centro que justifiquem o aparecimento desta não conformidade, uma vez que os valores obtidos para as contrações transversais são bastante semelhantes, não evidenciando diferentes níveis de orientação molecular.

5.1.2. EMPENO

A distorção de uma folha conforme o que se encontra apresentado na Figura 51 representa uma não conformidade denominada de empeno, tendo esta distorção origem na presença de diferentes níveis de orientação molecular presente na folha e, consequentemente, diferentes níveis de tensões residuais [4, 17, 134, 135].



Figura 51 - Representação 3D duma folha com empeno vista de frente.

No processo de extrusão de folha, por força dos métodos de arrefecimento empregues, existe a possibilidade de a folha manter a orientação imposta na fase de processamento, dando origem a tensões residuais, como mencionado anteriormente. Estas tensões traduzem-se numa curvatura da folha na direção transversal à extrusão.

Para que uma folha não apresente empeno estas tensões devem-se encontrar em equilíbrio, ou seja, as tensões residuais compressivas e as tensões residuais de tração devem possuir valores semelhantes, como ilustrado na Figura 52, onde a área referente aos dois tipos de tensão possui valores semelhantes [47, 136].

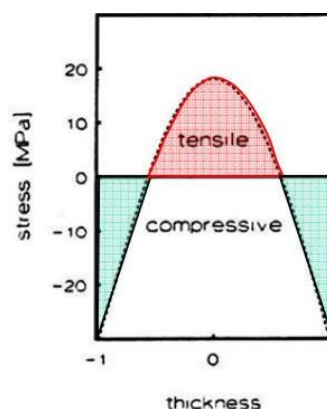


Figura 52 - Tensões residuais ao longo da espessura de uma folha. Adaptado de [136].

Um arrefecimento uniforme nas duas faces da folha previne o aparecimento desta não conformidade, originando contrações simétricas e, como tal, tensões residuais semelhantes. Caso o arrefecimento simétrico não se verifique, produzem-se folhas com empeno cuja concavidade se encontra na zona mais quente [47].

Esta não conformidade representa um problema para o cliente aquando da termoformação da folha, principalmente quando o aquecimento é efetuado por radiação. Isto deve-se às diferentes distâncias aos aquecedores, originadas pela curvatura da folha com empeno, como demonstrado na Figura 53, resultando em aquecimento diferencial/distribuição superficial de temperaturas acentuados.

Esta elevada diferença de temperatura significa que o centro, como zona mais próxima dos aquecedores, se encontra à temperatura de enformação, enquanto as extremidades ainda não possuem um módulo de relaxação adequado ao processo, produzindo um copo com diferenças de espessura superiores ao esperado, colocando em risco o seu desempenho mecânico, assim como no caso da ondulação. A Figura 53 apresenta o resultado das diferentes distâncias no aquecimento da folha.

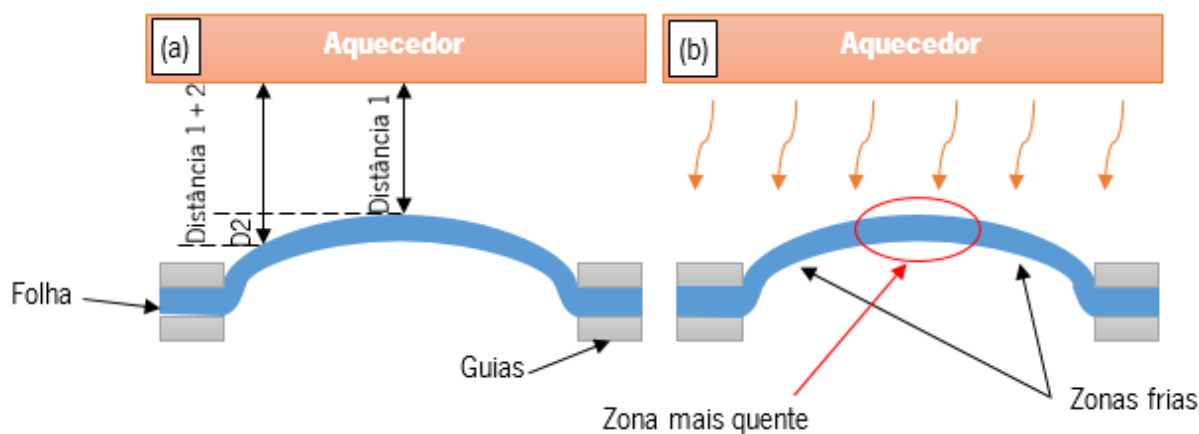


Figura 53 - Representação das diferentes distâncias que uma folha com empeno apresenta ao aquecedor em (a) e seu resultado em (b).

5.1.2.1. MEDIÇÃO

A medição desta não conformidade efetua-se por intermédio de um teste interno, com recurso a uma amostra de dois metros de folha, sendo esta colocada sobre uma superfície plana. Posteriormente, mede-se a altura entre a extremidade da folha e essa superfície. Este teste encontra-se explicitado na Figura 54.

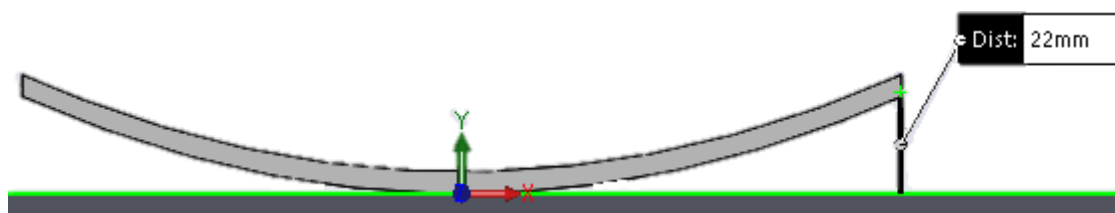


Figura 54 - Método de medição do empeno.

Por último, compara-se o valor obtido a partir da amostra com a especificação, verificando desta forma se esta se encontra dentro do estipulado. Com recurso ao exemplo apresentado na Figura 54, bem como a uma especificação típica desta não conformidade (20), pelo método descrito obtém-se o resultado apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Exemplificação duma tomada de decisão relativa à medição do empeno

Não Uniformidade	Especificação (mm)		Decisão	
	Definida	Obtida	Positiva	Negativa
Empeno	≤ 20	22		✓

5.1.2.2. CAUSAS

Como explicitado anteriormente, esta não conformidade tem por base a desigualdade de tensões residuais ao longo da sua espessura, sendo estas causadas por um arrefecimento não uniforme. Posto isto, as causas mais comuns encontram-se todas elas ligadas a fatores que influenciam o arrefecimento da folha e, consequentemente, a morfologia e tensões residuais da mesma.

Temperatura dos cilindros da calandra incorreta: Temperaturas dos cilindros da calandra incorretamente ajustadas promovem diferentes taxas de arrefecimento nas duas faces da folha. De modo a minimizar a possibilidade de empeno, o arrefecimento da folha deve ser simétrico, assegurando o mesmo nível de orientação, caso contrário a folha apresentará diferentes níveis de contração e, como resultado destas diferenças, exibirá empeno, formando uma concavidade para a zona com maior contração [17, 26, 75, 76, 134].

Temperatura dos cilindros de arrefecimento incorreta: Esta causa produz o mesmo efeito da causa anterior, ou seja, um arrefecimento não uniforme ao longo da espessura. Porém, o seu impacto é muito menor, dado que o calor é maioritariamente retirado da folha na calandra. Estes cilindros podem, em último recurso, auxiliar a correção de empeno vindo da calandra.

5.1.2.3. AÇÕES CORRETIVAS

As ações corretivas relativas ao empeno são na sua totalidade relacionadas com ajustes de temperatura, dado que este problema tem origem térmica, tendo como intuito a uniformização do

arrefecimento da folha. Uma vez que o fator importante na decisão das ações corretivas a efetuar é a celeridade da resolução e a sua simplicidade, a sequência inicia-se no ajuste da temperatura do cilindro para o qual a folha forma a concavidade.

1. Ajustar a temperatura do cilindro três da calandra, consoante o caso em análise.

- Apesar do segundo cilindro da calandra ser mais eficaz no arrefecimento da folha, o ajuste deve ser efetuado no cilindro de acabamento, ou seja, no terceiro cilindro da calandra. Isto deve-se ao facto de, ao contrário do cilindro de acabamento, o cilindro dois influenciar a linha de compensação, e, como tal, uma alteração na temperatura do cilindro dois altera a quantidade de material que forma esta linha, o que requer um novo ajuste desta linha, possibilitando o aparecimento de outras não conformidades
- Este ajuste deve ser efetuado consoante a face que contacta com o cilindro três. No caso do cilindro três contactar com a face convexa, deve-se proceder a um aumento da temperatura, sendo que caso este contacte com a face côncava deve-se reduzir a sua temperatura. No entanto, é importante garantir que a folha de PS abandona a calandra abaixo da sua temperatura de transição vítrea ($\pm 90^{\circ}\text{C}$).

2. Ajustar o fluxo da água dos cilindros de arrefecimento.

- Uma vez que a temperatura dos cilindros de arrefecimento não é controlada individualmente, não é possível ajustar a temperatura de um só cilindro de forma a garantir um arrefecimento uniforme. O ajuste do fluxo da água contorna esse problema, dado que quanto menor o fluxo de água dos cilindros, menor a quantidade de calor retirado da folha, permitindo arrefecer a folha como desejado.
- Contudo, esta medida apenas deve ser tomada como último recurso, uma vez que este fluxo teria que ser controlado manualmente, o que dificulta a obtenção de um processo constante.

5.1.2.4. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Uma vez que o empeno tem por base diferenças de orientação molecular entre as duas faces da folha, fruto de contrações dissimilares, procurou-se caracterizar o nível de orientação nessas mesmas faces e efetuar a comparação dos valores obtidos. Para tal, recorreu-se à técnica de birrefringência com

compensador de *Berek*, para a qual se preparou amostras na direção do fluxo, sendo o resultado da microscopia de luz polarizada exposto na Figura 55.

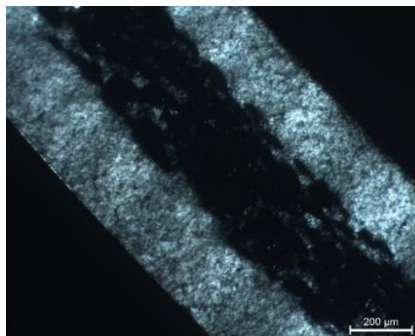


Figura 55 - Microscopia de luz polarizada de amostras retiradas duma folha da mistura de GPPS/HIPS com empeno. Ampliação de 10 na objetiva e 1.67 na câmara do microscópio.

Assim como no caso da ondulação, não são visíveis diferenças significativas de orientação entre as duas faces, impossibilitando a medição da orientação molecular por esta técnica. É de realçar que a amostra em questão apresenta irregularidades provenientes de microfissuras causadas pelo corte da folha na preparação da amostra, como demonstrado na Figura 56, onde é possível verificar em (a) a amostra em detalhe com ampliação de 20x1.67 em microscopia de luz polarizada e em (b) a mesma amostra em microscopia de campo claro.

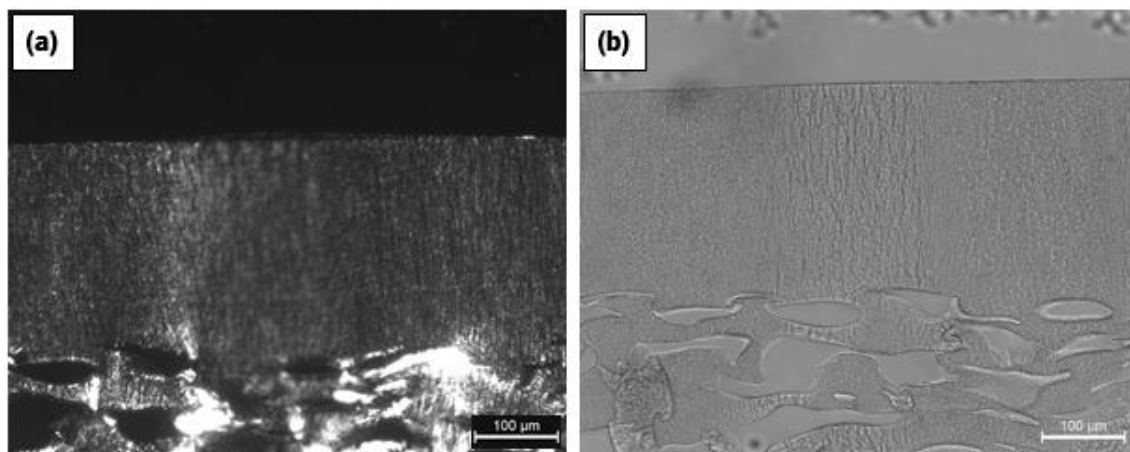


Figura 56 - Microfissuras resultantes do corte da mistura GPPS/HIPS a uma ampliação de 20, onde em (a) se utiliza microscopia de luz polarizada e em (b) microscopia de campo claro.

Posto isto, procurou-se recorrer ao teste da contração para determinar os níveis de orientação molecular presentes nas duas faces da folha com empeno. No entanto, este método não permitia efetuar uma medição da contração nas duas faces da folha separadamente devido a limitações da técnica e equipamento, resultando em valores da contração que seriam iguais nas duas faces da folha e de onde não seria possível retirar nenhuma conclusão. A intenção de obter os valores da contração para as duas

faces separadamente passava por conhecer os níveis de orientação molecular presentes nessas faces sem restrições impostas por outras zonas da folha, como a camada central, bem como a outra face que se pretendia testar.

5.1.3. FLECHA

A flecha, como o nome indica, resulta numa curvatura da folha para um dos seus lados, como consequência de um gradiente transversal de contração e/ou orientação molecular, como demonstrado na Figura 57. Este gradiente tem origem em desequilíbrios transversais ao longo do processamento da folha, podendo estes acontecer a nível do arrefecimento ou devido a fatores mecânicos [38].



Figura 57 - Representação do gradiente de orientação na direção transversal de extrusão. Adaptada de [137].

O alinhamento de todos os componentes da linha de extrusão, bem como a uniformidade do arrefecimento da folha ao longo da sua largura, são fatores essenciais para a produção de uma folha sem a ocorrência de flecha. Como mencionado anteriormente, durante o processamento existe a imposição de orientação molecular, sendo que o arrefecimento uniforme tem em vista minimizar diferentes níveis de contração e, conseqüentemente, diferentes níveis de orientação [38, 75].

Esta curvatura revela-se problemática do ponto de vista da termoformação, dado que a folha com flecha tem tendência para sair das guias utilizadas neste processo para a transportar ao longo da máquina. Isto vai ter como consequência a paragem do processo para recolocar a folha entre as guias.

5.1.3.1. MEDIÇÃO

O método de medição da flecha trata-se de um método desenvolvido internamente, no qual se extrude uma bobine de amostra da produção a decorrer, que repousa por um tempo determinado.

Dessa bobine, retira-se uma amostra junto ao mandril cujo comprimento varia de acordo com a aplicação, sendo o comprimento mais comum seis metros. Isto deve-se ao facto deste ser definida pelo comprimento da termoformadora onde será processada, uma vez que este teste tem em vista simular o comportamento da folha dentro de uma máquina de *form-fill-seal*. De seguida, dois vértices dessa amostra são alinhados por uma linha paralela à direção de extrusão, medindo-se a flecha através do deslocamento da folha em relação à linha na zona de central. Este método encontra-se explicitado na Figura 58.

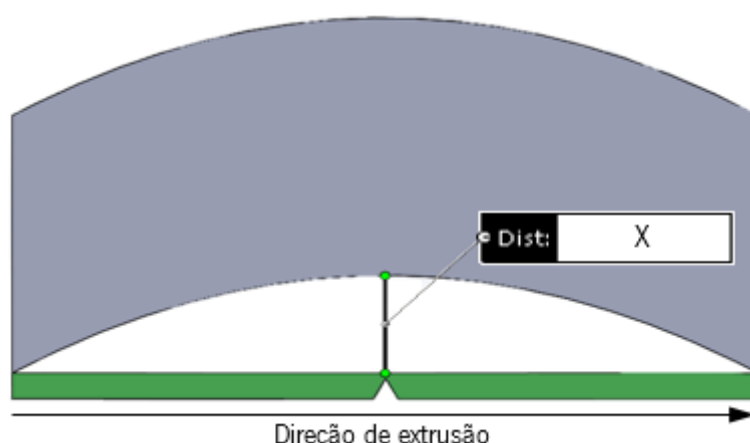


Figura 58 - Representação 2D (vista de cima) do método de medição da flecha, onde x é a medida a determinar.

Na Tabela 8 encontra-se disponibilizado o resultado de uma amostra efetuada com base neste método, assim como a especificação do cliente quanto a este parâmetro.

Tabela 8 - Parâmetros relevantes e valores obtidos numa medição de flecha.

Especificação (mm)	Amostra (mm)	Decisão	
		Positiva	Negativa
≤ 10	11		✓

Como se pode verificar o valor da flecha da amostra retirada é superior ao acordado com o cliente e, como tal, a decisão referente a esta zona é negativa, ou seja, é considerada a presença de uma não conformidade.

5.1.3.2. CAUSAS

A investigação às possíveis causas desta não conformidade revelou que as mais comuns encontram-se relacionadas com a máquina, apontando-se três nesta categoria que são o desalinhamento dos rolos de passagem, a formação de um gradiente de temperatura na fieira e a formação de um gradiente de temperatura na calandra. Considera-se também possível uma causa relacionada com o

método utilizado, sendo ela o desalinhamento do rolo de cartão no bobinador. As causas referentes à máquina são aquelas que representam um maior problema, dado que pode ser necessário parar a produção para eliminar a causa ou, porventura, proceder à troca de algum componente.

O diagrama de *Ishikawa* resultante desta investigação encontra-se exposto na Figura 59.

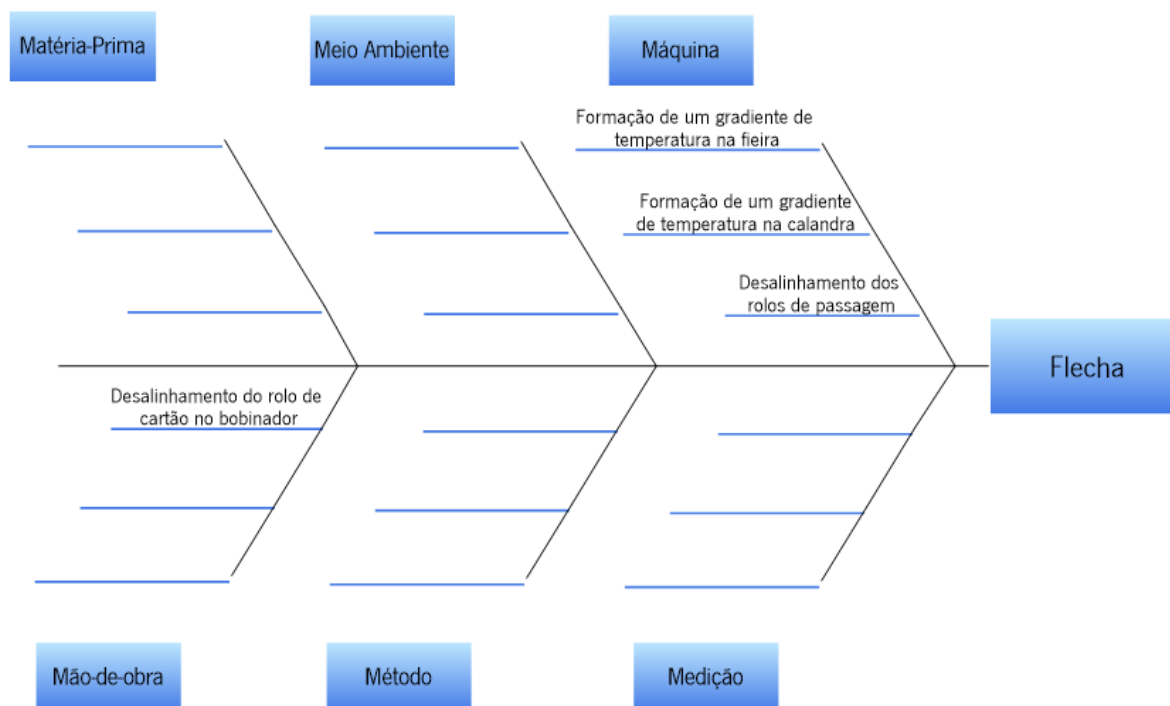


Figura 59 - Diagrama de *Ishikawa* referente à não conformidade em questão.

Desalinhamento do rolo de cartão no bobinador: O desalinhamento do rolo de cartão no bobinador tem como resultado um desequilíbrio de tensões na folha, provocando um maior estiramento numa das extremidades, enquanto permite uma maior relaxação molecular na extremidade menos estirada ou induz uma menor orientação nesta zona. Dado que esta diferença de tensão se reflete em toda a linha de extrusão, a folha é exposta ainda acima da temperatura de transição vítrea a diferentes níveis de tensão ao longo da sua largura e, como tal, existe a introdução de diferentes níveis de orientação molecular. Esses diferentes níveis de orientação manifestam-se como flecha, apresentando curvatura em torno da zona menos estirada, dado que a folha é arrefecida até não possuir mobilidade molecular, ou seja, abaixo de T_g , sob esse desequilíbrio de tensão [17, 38].

Desalinhamento dos rolos de passagem: O efeito dum desalinhamento dos rolos de passagem, como o demonstrado na Figura 60, é similar ao descrito na causa anterior, ou seja, uma extremidade da bobine encontra-se sob maior tensão, enquanto a outra se encontra mais relaxada. Como

mentionado anteriormente, diferenças de tensão resultam na produção de uma folha com flecha, sendo curvatura em torno da zona menos estirada [17, 38].



Figura 60 - Representação de desalinhamentos na linha, potenciando o aparecimento de flechas. Adaptada de [138].

Formação de um gradiente de temperatura na fieira: A existência de um gradiente transversal de temperatura na folha à saída da fieira pode causar flecha, inclusivamente com um arrefecimento apropriado da folha. Esta flecha seria o resultado duma maior contração do material na zona mais quente, uma vez que dispõe de mais tempo para relaxar a orientação imposta previamente, dado os diferentes momentos de solidificação. Posto isto, a curvatura forma-se em torno da zona de maior temperatura [38, 75].

Formação de um gradiente de temperatura na calandra: O desenvolvimento de um gradiente transversal de temperaturas na calandra tem como origem a transferência de calor entre a folha, o cilindro da calandra e a água da calandra. No interior dos cilindros existe um fluxo de água a uma temperatura inicial (de entrada) predefinida com o objetivo de retirar calor à folha, conduzindo-o para a água e, deste modo, promover a sua solidificação [139]. Contudo, à medida que essa transferência ocorre existe um incremento da temperatura da água ao longo do comprimento do cilindro, como apresentado na Figura 61, o que lhe vai retirando a sua capacidade de arrefecer a folha a jusante.

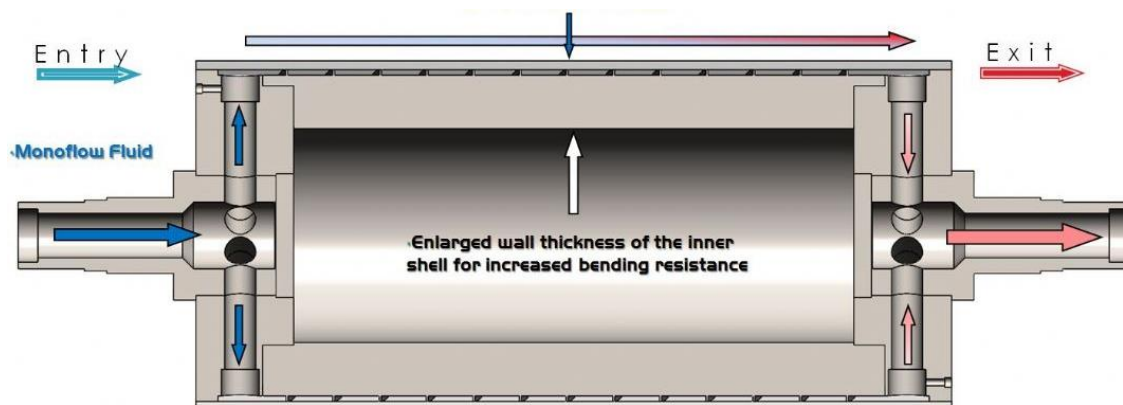


Figura 61 - Representação do percurso da água numa calandra. O aquecimento da água encontra-se representado pela transição do azul (temperatura menor) para o vermelho (temperatura maior). Adaptada de [140].

A formação deste gradiente de temperatura entre as duas extremidades da calandra causa um arrefecimento não uniforme que, assim como no caso da temperatura do fundido, resulta numa maior relaxação da orientação molecular e, como consequência, numa maior contração da zona mais quente, como ilustrado na Figura 62 [38, 75].

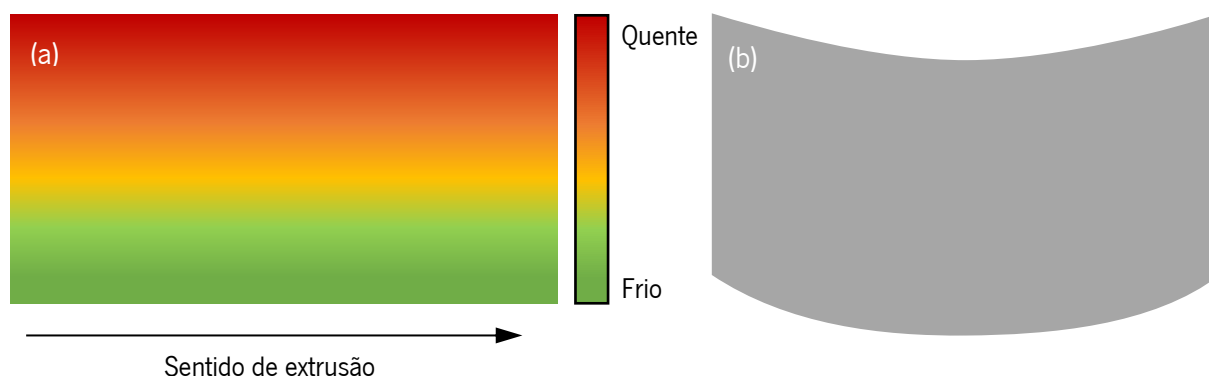


Figura 62 - Efeito dum gradiente transversal de temperatura, onde em (a) encontra-se exposta uma folha com diferentes temperaturas e em (b) se apresenta a folha após o arrefecimento.

5.1.3.3. AÇÕES CORRETIVAS

Iniciam-se as verificações relativas à não conformidade em estudo pelo local mais exposto à ocorrência de erros, ou seja, pelo alinhamento do rolo de cartão no bobinador. Sempre que uma bobine atinge o peso especificado dá-se o corte da folha e inicia-se uma nova bobine num novo rolo de cartão. Esta operação é efetuada frequentemente durante a produção de uma encomenda, sendo, quando comparada aos outros fatores que originam flecha, a operação mais propícia à criação da não conformidade.

Posto isto, a sequência de verificações a efetuar é a seguinte:

1. Verificar o alinhamento da folha com os restantes componentes.

- Esta verificação consumada visualmente. Em caso de dificuldade em alinhar a folha produzida com o laser, deve-se recorrer a anéis de guiamento, facilitando assim a tarefa.

2. Verificar o alinhamento dos rolos de passagem.

- Esta verificação deve ser efetuada com recurso a instrumentos de medição.

3. Verificar a temperatura da folha à saída da fieira.

- Esta verificação pode ser efetuada com recurso a uma câmara termográfica, sendo que na eventualidade de o fundido possuir temperaturas diferentes deve-se proceder ao ajuste das temperaturas da fieira.

4. Verificar a temperatura de entrada e saída de água da calandra.

- Esta verificação pode ser efetuada com recurso a uma sonda do tipo k. A diferença de temperatura entre os dois extremos da calandra não deve ser superior a 5°C.

5.1.3.4. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

De forma a comprovar as principais causas apontadas para a flecha, efetuaram-se as verificações explicitadas anteriormente a uma produção com a não conformidade em questão. Iniciaram-se estas verificações pelo alinhamento da folha com o rolo de cartão utilizado, bem como com o laser de guiamento do bobinador, encontrando-se essa averiguação exposta na Figura 63.



Figura 63 - Alinhamento da folha com o laser de guiamento.

Como se pode observar, todos os elementos do conjunto analisado encontram-se alinhados, indicando que a não conformidade não tem por base esta causa. Desta forma, dado que o problema não

se encontrava no alinhamento do conjunto analisado, procedeu-se à segunda verificação apresentada na secção anterior, ou seja, verificou-se o alinhamento dos rolos de passagem.

Assim como na verificação anterior, existe um bom alinhamento entre os rolos de passagem, descartando o que seria uma possível causa para a existência de flecha. Posto isto, procurou-se investigar, com recurso à câmara termográfica *Testo 869*, a existência de um gradiente de temperatura entre as duas extremidades da folha à saída da fieira. Explicitam-se na Figura 64 as temperaturas observadas.

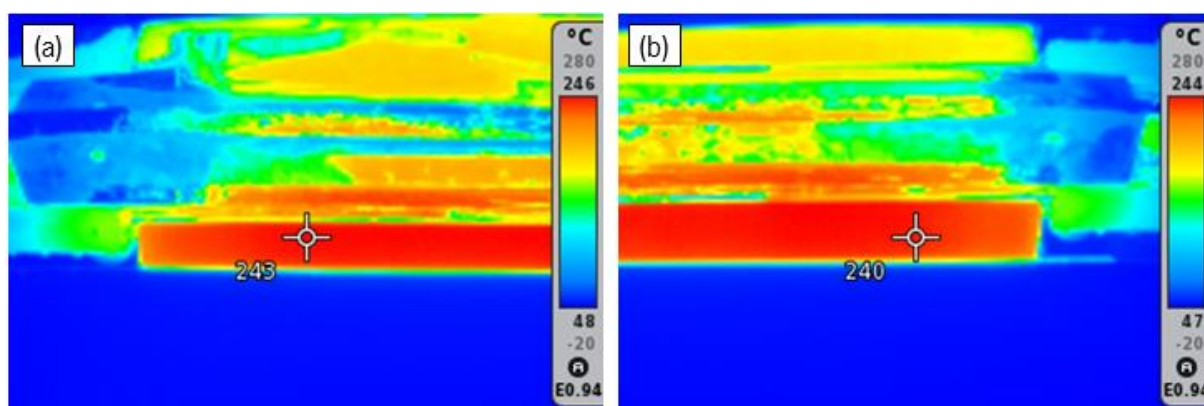


Figura 64 - Temperatura da folha à saída da fieira, onde em (a) se encontra a extremidade esquerda e em (b) a extremidade direita, considerando a direção de extrusão.

As temperaturas registadas revelam a existência de uma diferença de temperatura de 3°C entre as duas extremidades, o que apesar de ser uma diferença relativamente pequena, pode possuir um grande impacto na relaxação dos estímulos impostos às moléculas devido aos tempos de relaxação extremamente reduzidos. Deste modo, averiguou-se a existência deste gradiente após o arrefecimento da folha, uma vez que a permanência deste gradiente após o arrefecimento indica que a solidificação das duas extremidades ocorreu em momentos diferentes, gerando flecha. As imagens obtidas através da câmara termográfica encontram-se expostas na Figura 65.

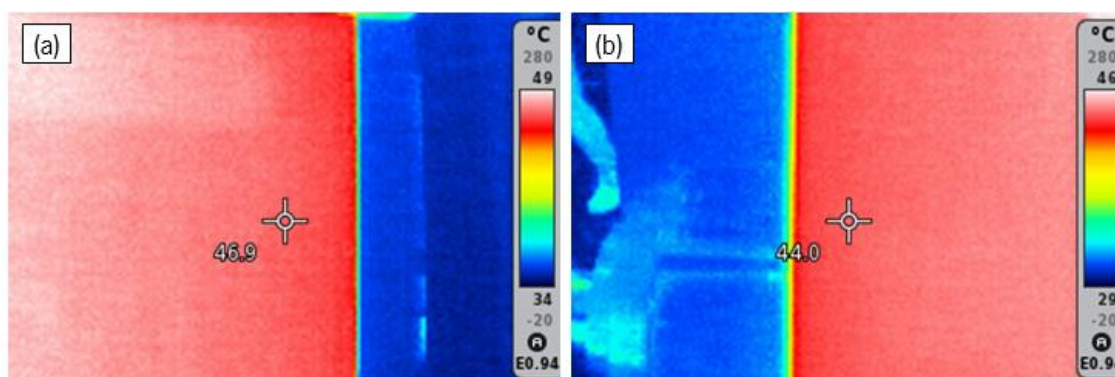


Figura 65 - Temperatura após o arrefecimento, onde em (a) se encontra a extremidade esquerda e em (b) a extremidade direita, considerando a direção de extrusão.

Analisando a figura observa-se a existência do gradiente de temperatura imposto à saída da feira após a fase de arrefecimento, potenciando a teoria de que esta diferença de temperatura entre as extremidades poderia estar relacionada com a presença de flecha. É de notar que as duas zonas mais quentes correspondem à mesma extremidade na mesma face. Isto deve-se ao facto, de para efetuar esta medição na mesma face, ser necessário efetuar uma rotação de 180 graus em relação à direção de extrusão, explicitada na Figura 66, transparecendo a ideia de existir uma troca das extremidades.

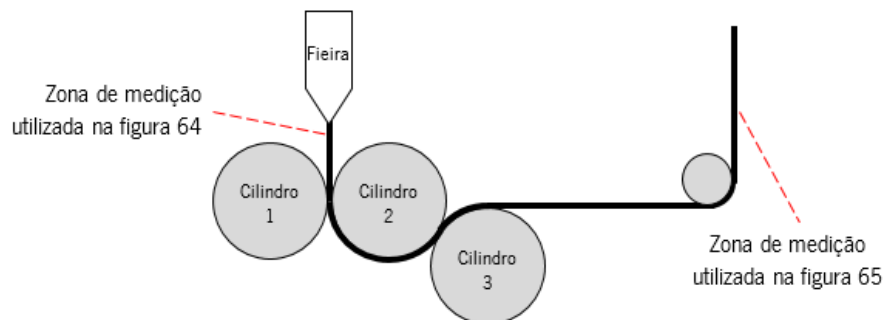


Figura 66 - Representação das zonas onde se procedeu às medições da temperatura apresentadas na Figura 64 e na Figura 65.

De forma a confirmar a teoria que a diferença de temperatura estaria na origem dos diferentes níveis de orientação molecular presentes na folha, procurou-se investigar os níveis de orientação molecular nas duas extremidades da folha através da medição da birrefringência.

A análise ao microscópio de luz polarizada de amostras retiradas, na direção da extrusão, a partir de uma folha com flecha tinha em vista a medição da orientação molecular nas suas duas extremidades, como explicitado anteriormente. O resultado da visualização dessas amostras ao microscópio encontra-se apresentado na Figura 67.

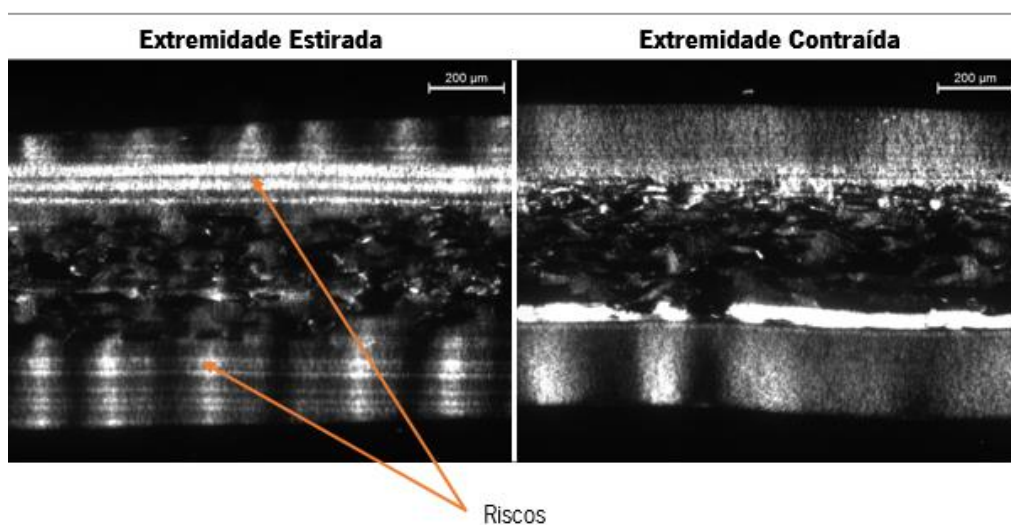


Figura 67 - Corte lateral da folha da mistura de GPPS/HIPS observado ao microscópio com uma ampliação de 10 na objetiva e 1.67 na câmara do mesmo.

Assim como no caso das duas não conformidades anteriores, visualmente as duas zonas apresentam-se muito uniformes, não sendo possível visualizar diferenças significativas de orientação nas amostras. Este fator mais uma vez inviabilizou a análise da orientação molecular.

É de notar que na extremidade estirada são visíveis riscos provocados pela faca de corte, uma vez que não se encontram paralelos à amostra, mas sim a um certo ângulo. Isto deve-se ao facto de ser uma prática comum colocar a faca no micrótomo a um certo ângulo, induzindo assim esse mesmo ângulo nos danos provocados pela faca na amostra, como é o caso, impedindo que estes sejam confundidos com estruturas morfológicas devido ao processamento. Observa-se, de igual modo, a existência de zonas irregulares que aparentam possuir orientação diferente da verificada nas restantes zonas da amostra.

Porém, essas zonas irregulares, assim como os riscos, são criadas no momento do corte da amostra, ou seja, são zonas modificadas pelo corte que escondem a orientação imposta pelo processo de extrusão, como aconteceu nas não conformidades anteriores. Isto deve-se à criação de microfissuras, apresentadas na Figura 68, com microscopia de luz polarizada e campo claro, como resultado do comportamento frágil que o PS descreve à fratura. As figuras completas encontram-se no Anexo G -.

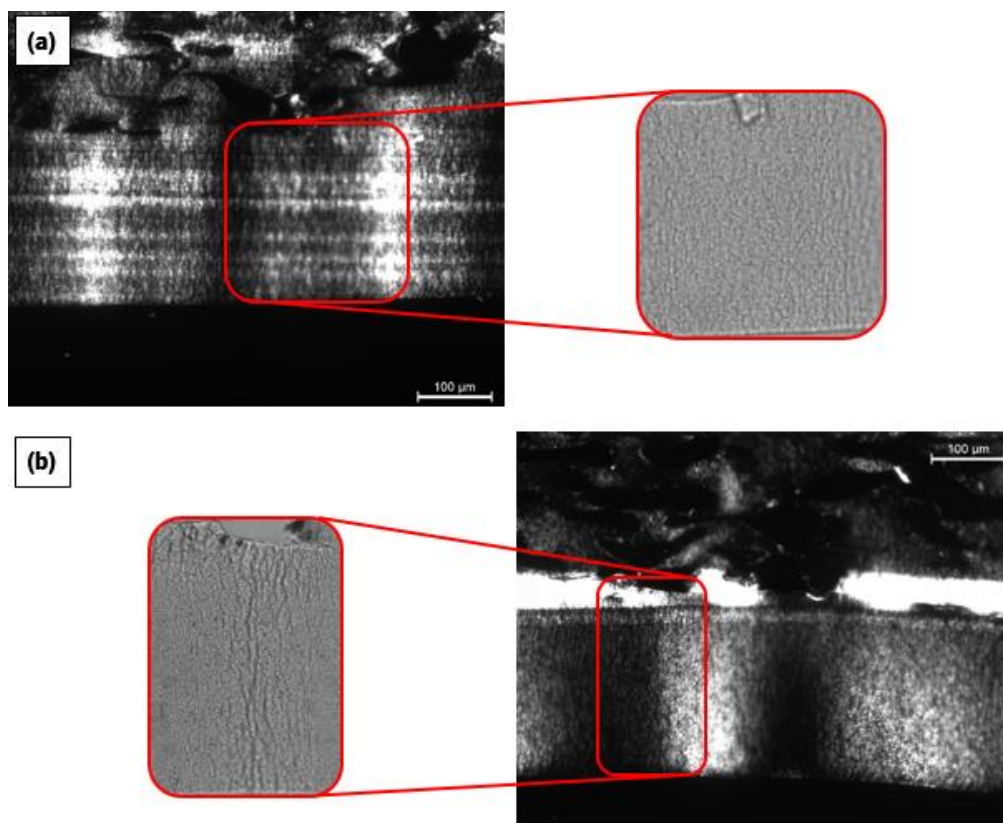


Figura 68 – Pormenor das microfissuras da mistura de GPPS/HIPS observado ao microscópio com uma ampliação de 20 na objetiva e 1.67 na câmara do mesmo, onde em (a) se trata da extremidade estirada e em (b) se trata da extremidade contraída.

Uma vez que o ensaio de birrefringência se demonstrou inconclusivo, considerou-se a medição da contração do material nas duas extremidades da folha como uma forma de retirar ilações sobre os níveis de orientação molecular.

Posto isto, foram retiradas 5 amostras de ambas as extremidades da folha com flecha, de forma a possuir uma maior certeza dos resultados obtidos. De uma folha com a mesma composição que aquela onde se registou flecha, mas aonde não se registou qualquer não conformidade, retirou-se, de igual modo, 5 amostras de cada extremidade. Estas amostras funcionam como teste de controlo, ou seja, funcionam como base de comparação com as amostras de material com flecha, permitindo perceber se diferentes valores para a contração são resultado de diferentes níveis de orientação devido à presença da não conformidade em causa. Na Figura 69 encontra-se amostras depois do teste em questão.

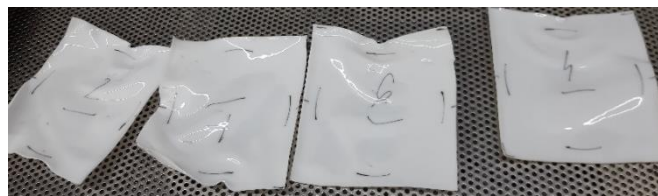


Figura 69 - Amostras de material com flecha após o teste de contração.

Os valores de contração obtidos a partir das amostras de controlo, presentes no Anexo H -, em conjunto com os valores de contração obtidos a partir das amostras de material com flecha, presentes no Anexo I -, permitiram a formação de gráficos de comparação da contração, gráficos estes que se encontram presentes nas Figura 70 e na Figura 71.

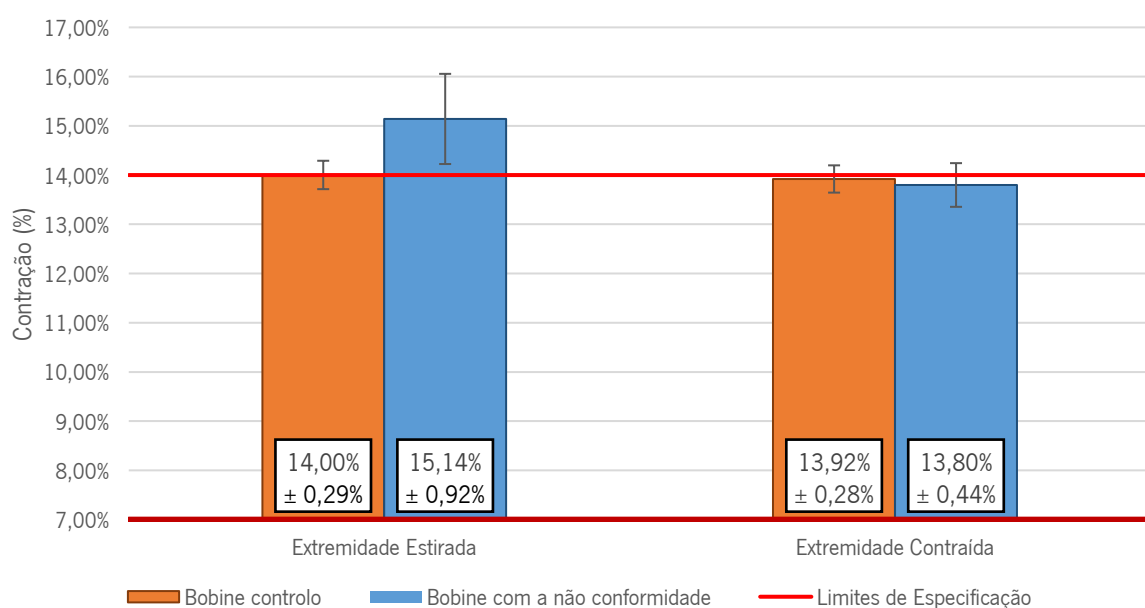


Figura 70 - Valores obtidos no teste da contração para a direção longitudinal das amostras de controlo e de material com flecha.

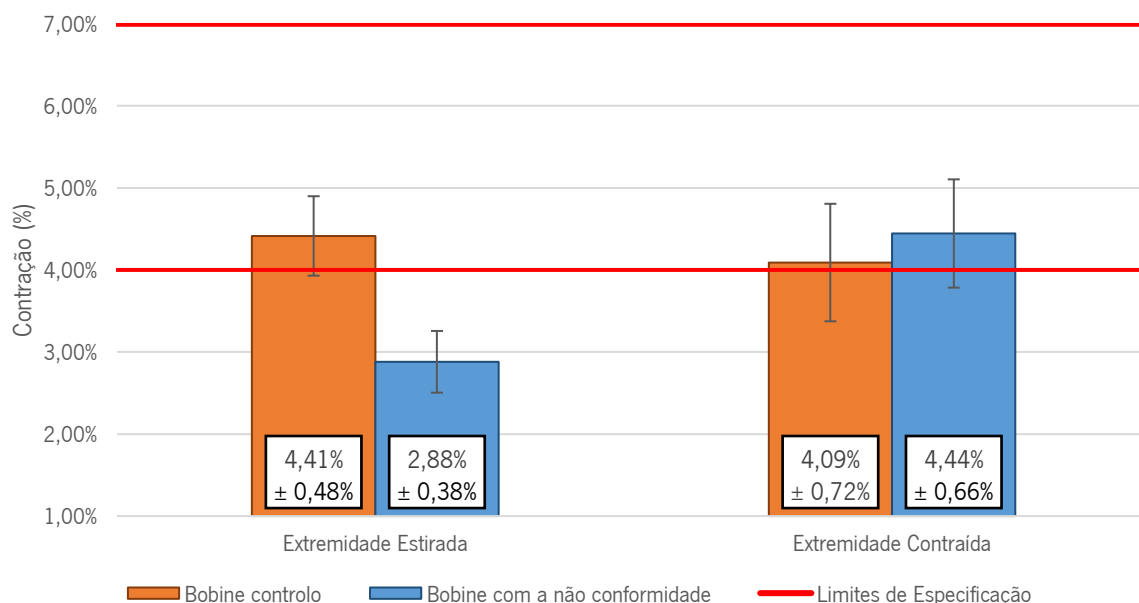


Figura 71 - Valores obtidos no teste da contração para a direção transversal das amostras de controle e de material com flecha.

Como é possível observar nos gráficos apresentados, existe uma maior contração longitudinal na extremidade estirada quando comparada com a amostra de controle, bem como com a extremidade contraída da mesma amostra, sendo que esta última apresenta uma redução da contração em relação ao teste de controle. Isto deve-se ao maior alinhamento das moléculas na extremidade estirada que, ao ser aquecida, permite um relaxamento destas moléculas. Esse relaxamento e consequente retorno à conformação de menor energia, formando um enovelamento aleatório, provoca uma maior contração quando comparada a uma amostra com as mesmas dimensões mas níveis de orientação menores, como é o caso da amostra de controle e da amostra pertencente à extremidade contraída. A amostra relativa à extremidade contraída apresenta uma menor contração que a amostra de controle do mesmo lado da folha, que, em caso de flecha, seria uma extremidade contraída devido aos menores níveis de orientação molecular, uma vez que no processamento foi permitido às moléculas desta extremidade relaxar mais que o normal, levando a uma menor contração.

Estas conclusões são apoiadas pelos dados obtidos para a contração transversal, uma vez que com maior contração longitudinal, como verificado na extremidade estirada, ocorre menor contração transversal dado que a existência de uma orientação predominante na direção longitudinal reduz os níveis de orientação presentes na direção transversal, o que gera uma menor contração para este último, relativamente ao teste de controle. Inversamente e como esperado, para a extremidade contraída o valor da contração verificado é maior, precisamente pelas razões apresentadas anteriormente.

5.2. NÃO CONFORMIDADES RELATIVAS AO PET

Uma vez que a empresa se encontra a iniciar a produção de folhas em PET, dados relativos a este produto são inexistentes. Deste modo, numa primeira fase realizou-se o levantamento das não conformidades verificados nas produções em curso, logo a análise recaiu em não conformidades internas, ao contrário das não conformidades relativas à mistura de GPPS/HIPS, cuja análise se baseou em reclamações.

5.2.1. PERDA DE TRANSPARÊNCIA

A transparência de um material encontra-se associada à forma como este processa a luz incidente. Quando a luz interage com materiais poliméricos podem ocorrer diversos fenómenos, retratados na Figura 72, como a refração e a reflexão da luz.

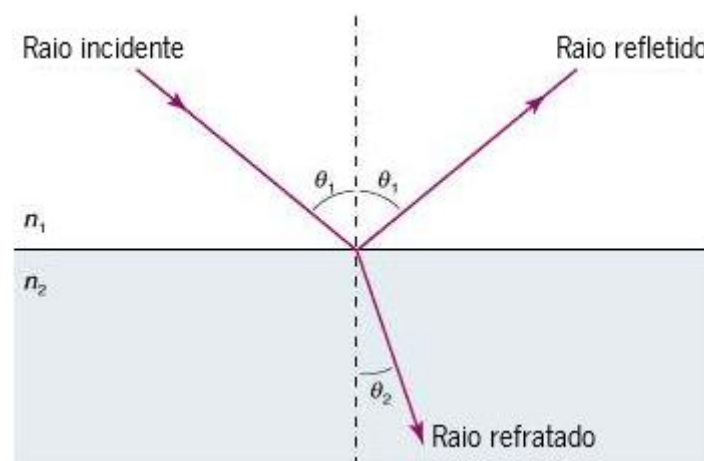


Figura 72 - Decomposição da luz incidente ao entrar em contacto com uma superfície. Adaptada de [141].

O feixe de luz que sofre refração quando esta incide na fronteira de separação entre dois meios com diferentes índices de refração, ou seja, com diferentes velocidades de propagação da luz, pode sofrer absorção e difusão ao longo do corpo que o fazem perder energia, sendo a difusão a causa principal da perda de transparência.

A absorção trata-se da dissipação da luz sob a forma de calor que, na maior parte dos polímeros, não ocorre significativamente e, como tal, são praticamente incolores sem aditivos. A difusão ocorre quando existe uma distribuição do feixe de luz principal num conjunto de novos feixes, cada um com a sua direção de propagação. Esta distribuição deve-se à presença de centros difusores cujo índice de

refração difere do índice da matriz polimérica onde estes centros se encontram presentes, criando flutuações do índice de refração no interior da amostra e, como tal, a perda de transparência. O tamanho destes centros difusores é igualmente importante, dado que o ângulo de difusão varia com essa dimensão, alterando a distribuição dos feixes difundidos. Este efeito encontra-se representado na Figura 73.

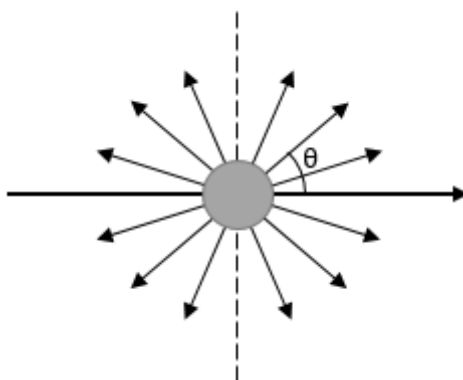


Figura 73 - Difusão da luz por uma partícula, onde θ representa o ângulo de difusão.

Todavia, a perda de transparência não se deve apenas a fenómenos de difusão no interior da amostra, pois a reflexão superficial difusa também causa perda de transparência, sendo esta reflexão a principal causa desta não conformidade em filmes poliméricos. A reflexão superficial difusa, assim como a difusão no interior da amostra, difunde o feixe luminoso numa gama de novos feixes, como demonstrado na Figura 74.

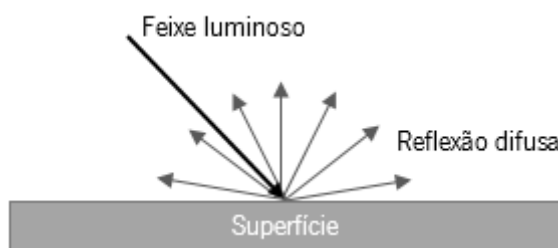


Figura 74 - Reflexão superficial difusa de um feixe luminoso.

A perda de transparência representa uma não conformidade uma vez que o cliente deseja que o seu produto seja visível através da embalagem. Contudo, por norma, não existe um valor definido para a opacidade permitida, sendo esta avaliada através de amostras enviadas ao cliente.

5.2.1.1. CAUSAS

Uma vez que esta não conformidade tem origem em flutuações do índice de refração ao longo da folha, são consideradas causas principais para esta não conformidade fatores que levam a essa flutuação, ou seja, que aumentam a difusão da luz. Nesta análise são consideradas também causas que aumentem a difusão da luz por reflexão superficial difusa. Estas considerações levaram à formação do diagrama de *Ishikawa* apresentado na Figura 75.

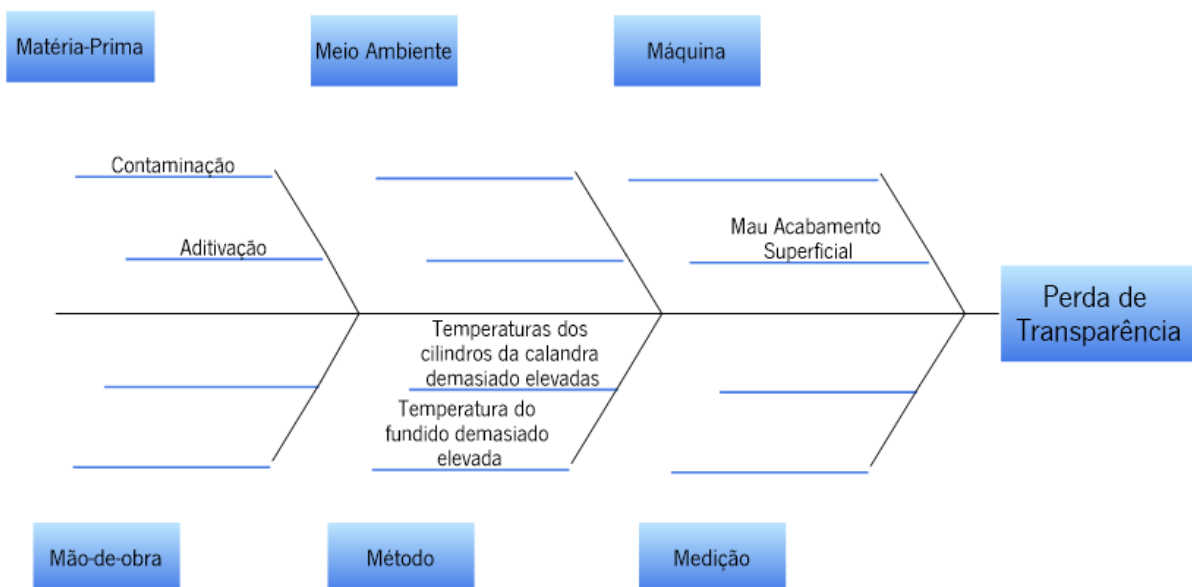


Figura 75 - Diagrama causa-efeito referente à não conformidade "Perda de Transparência".

Causas relacionadas com a difusão da luz

Temperaturas dos cilindros da calandra elevadas: Nos polímeros semicristalinos, como o PET, a taxa de arrefecimento imposta pelos cilindros da calandra é de elevada importância, dado que esta taxa possui uma enorme influência na cristalização do polímero. Em polímeros semicristalinos temperaturas dos cilindros da calandra elevadas potenciam a formação de estruturas organizadas, uma vez que a taxa de arrefecimento imposta será reduzida. A menor taxa de arrefecimento permite às moléculas mais tempo para formar esferulites que possuem dimensões superiores ao comprimento de onda visível e um índice de refração superior ao da zona amorfa do polímero. Estes dois fatores em conjunto levam à difusão do raio luminoso quando existe uma transição da luz entre estas duas zonas [142, 143].

Taxas de arrefecimento elevadas fruto de baixas temperaturas dos cilindros da calandra, reduzem a cristalização do material ou, inclusivamente, suprimem este fenómeno [28, 143]. Isto deve-

se ao rápido decréscimo da viscosidade do polímero, o que reduz o transporte por difusão das moléculas das zonas desorganizadas até ao núcleo [144].

Temperatura do fundido demasiado elevada: A orientação imposta ao material pela sua extrusão, em conjunto com a baixa viscosidade resultante duma temperatura do fundido demasiado elevada, aceleram a cristalização, dado que o número de núcleos iniciais formados devido ao alinhamento molecular é superior. O transporte dos segmentos das cadeias para o núcleo também beneficia duma temperatura superior devido à menor viscosidade e, consequentemente, resistência a esse transporte [143].

Aditivação: A incorporação de aditivos numa matriz polimérica retira transparência uma vez que possuem índices de refração diferentes do polímero, difundindo a luz incidente segundo o mecanismo explicitado anteriormente. Estes aditivos podem ainda funcionar como pontos de nucleação, promovendo a cristalização que reduz a transparência da folha. Assim como no caso das esferulites, a opacidade aumenta com o aumento das dimensões da substância incorporada [143, 145].

Contaminação: A contaminação da matriz polimérica pode ocorrer devido a material remanescente duma produção anterior não expelido durante a purga. Isto pode acontecer devido à acumulação desse material em zona onde este se degradou, bem como devido a presença desse material nos filtros e no fuso [38].

Por outro lado, a contaminação pode ser proveniente do reciclado, na eventualidade de existir a sua incorporação, dado que este pode possuir substâncias não compatíveis com o polímero ou, no caso de ser pós consumo, possuir coloração, resultando numa perda de transparência. Pode ocorrer também uma perda de transparência devido ao reciclado se a sua percentagem de incorporação for demasiado elevada [38, 146].

Causas relacionadas com a reflexão superficial difusa

Mau acabamento superficial: O acabamento superficial de uma folha é controlado pela qualidade do acabamento dos cilindros da calandra, sendo esta a razão do seu polimento ser tão importante. Na eventualidade de o acabamento destes cilindros se encontrarem em mau estado, isso transmite-se à folha que, por sua vez, possuirá um mau acabamento superficial. Este mau acabamento origina a difusão da luz incidente na superfície em questão, reduzindo a transparência da folha [38, 147].

5.2.1.2. AÇÕES CORRETIVAS

Iniciam-se as ações corretivas pelas etapas que reduzem a cristalização da folha de PET uma vez que esta é, por norma, a principal causa de perda de transparência numa produção com recurso a matérias-primas semicristalinas. Posto isto, a sequência de ações a efetuar na ocorrência desta não conformidade encontra-se apresentada de seguida.

1. Reduzir a temperatura dos cilindros da calandra.

- Esta ação promove a transferência de calor entre os cilindros da calandra e a folha.

2. Reduzir a temperatura do fundido.

- Esta redução pode ser efetuada nas temperaturas da fieira, bloco distribuidor e/ou da extrusora.

3. Verificar a condição dos cilindros da calandra.

- Caso existam cilindros com um acabamento superficial inadequado estes devem ser recondicionados ou substituídos.

4. Verificar a composição da folha.

- A incorporação de reciclado pode-se encontrar demasiado elevada ou pode haver um erro na seleção do material reciclado. Verificar também se existe a incorporação de aditivos capazes de difundir a luz incidente.

5. Alterar a composição da folha, adicionando agente nucleante.

- Esta ação corretiva apenas deve ser tomada em último caso, uma vez que implica a alteração da composição. Uma vez que o produto se destina à indústria alimentar é necessário que o agente nucleante possua compatibilidade alimentar.

5.2.1.3. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Com o intuito de efetuar a validação experimental das causas e respetivas ações corretivas procedeu-se à extrusão de folhas de PET, variando a temperatura dos cilindros da calandra enquanto se mantinham constantes as restantes condições. Esta variação tinha como objetivo avaliar o impacto do grau de cristalinidade na transparência, uma vez que este é o principal responsável pela perda de transparência.

Na Tabela 9 encontram-se os vários conjuntos de temperaturas utilizadas para os cilindros da calandra na obtenção das várias amostras, sendo que as condições comuns se encontram discriminadas no Anexo J -.

Tabela 9 - Temperaturas utilizadas para os cilindros da calandra na obtenção das várias amostras de PET.

Amostras	Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3
Amostra 1	20°C	28°C	38°C
Amostra 2	30°C	38°C	48°C
Amostra 3	40°C	48°C	58°C
Amostra 4	60°C	68°C	78°C

Após adquirir as amostras, procedeu-se a medição da sua transparência através da técnica de transmitância luminosa descrita na secção 4.2.4, de forma a verificar se existia alguma diferença nesta propriedade, uma vez que a nível visual não era possível tal distinção. Os resultados obtidos com recurso a esta técnica encontram-se detalhados no Anexo K - e resumidos na Figura 76.

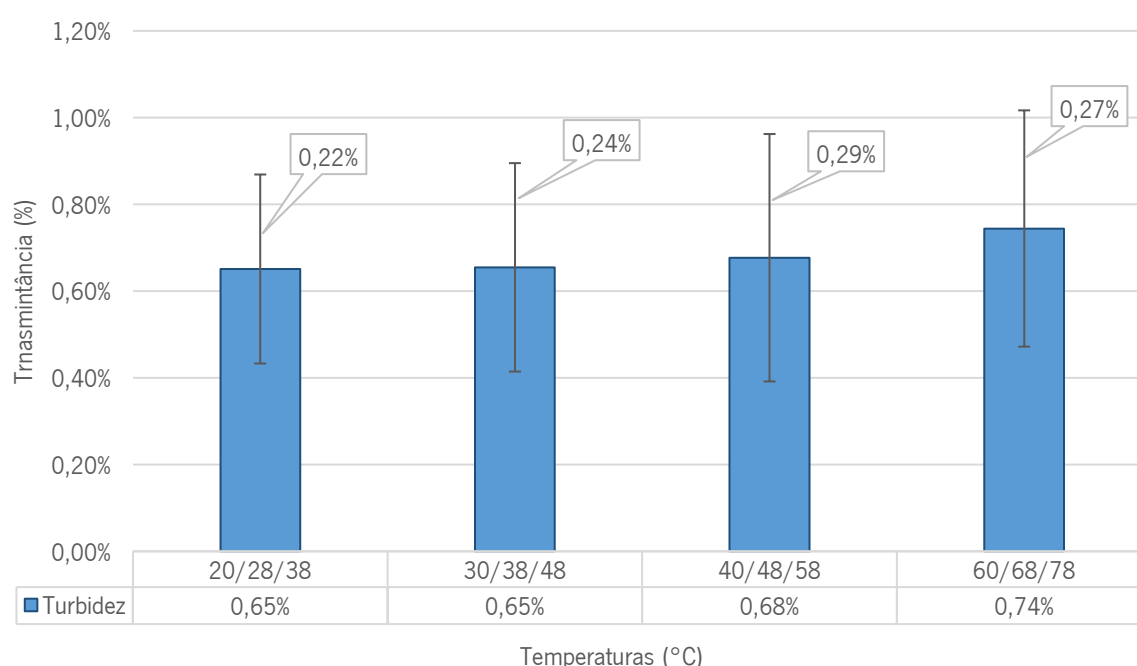


Figura 76 - Valores da transmitância luminosa obtida com as várias temperaturas dos cilindros da calandra.

Analisando os valores obtidos é possível aferir que, apesar da elevada diferença na temperatura dos cilindros da calandra, as transmitâncias luminosas são semelhantes, denotando-se apenas uma ligeira subida na condição onde as temperaturas utilizadas foram mais elevadas. A existência de uma

subida vai de encontro ao que seria de esperar, contudo esta é inferior ao esperado, uma vez que com estas temperaturas o PET deveria possuir uma cristalinidade que produzisse uma opacidade bastante superior.

Posto isto, estudou-se o grau de cristalinidade das várias amostras recorrendo à técnica de DSC, de forma a examinar se estes possuem valores semelhantes, assim como no caso da transmitância. Na Tabela 10 estão explicitados os resultados obtidos para esta característica, sendo que no Anexo L - se encontram as curvas de fluxo de cada amostra.

Tabela 10 - Valores obtidos no DSC para a entalpia de fusão e grau de cristalinidade.

Temperaturas dos cilindros da calandra (°C)	Entalpia de Fusão (J/g)	Grau de Cristalinidade (%)
20/28/38	32,87	28,09
30/38/48	34,15	29,19
40/48/58	34,35	29,36
60/68/78	35,74	30,55

Observando os valores obtidos é possível retirar que a ligeira subida na transmitância é acompanhada de um aumento no grau de cristalinidade das amostras, comprovando assim impacto do grau de cristalinidade na transparência, bem como as causas que o afetam. Contudo, assim como no caso da transmitância luminosa, o aumento do grau de cristalinidade é inferior ao esperado. Considera-se que isto se deva ao facto de estas amostras terem sido obtidas numa linha experimental, na qual os cilindros da calandra e respetivas temperaturas não sejam tão influentes como aqueles que se encontram numa linha industrial.

Após a comprovação de que o grau de cristalinidade possui de facto influência na transparência, procurou-se avaliar também o impacto da aditivação da folha de PET nessa propriedade. Posto isto, estudou-se esse impacto variando a incorporação de *antiblock* numa folha de PET, uma vez que este aditivo é bastante utilizado neste produto para prevenir a sua adesão. É de notar que as condições de processamento utilizadas foram as mesmas que na comprovação do grau de cristalinidade, utilizando como temperaturas para os cilindros da calandra 20/28/38°C. Na Figura 77 e no Anexo M - estão demonstrados os resultados da variação da percentagem de incorporação de *antiblock* na transmitância.

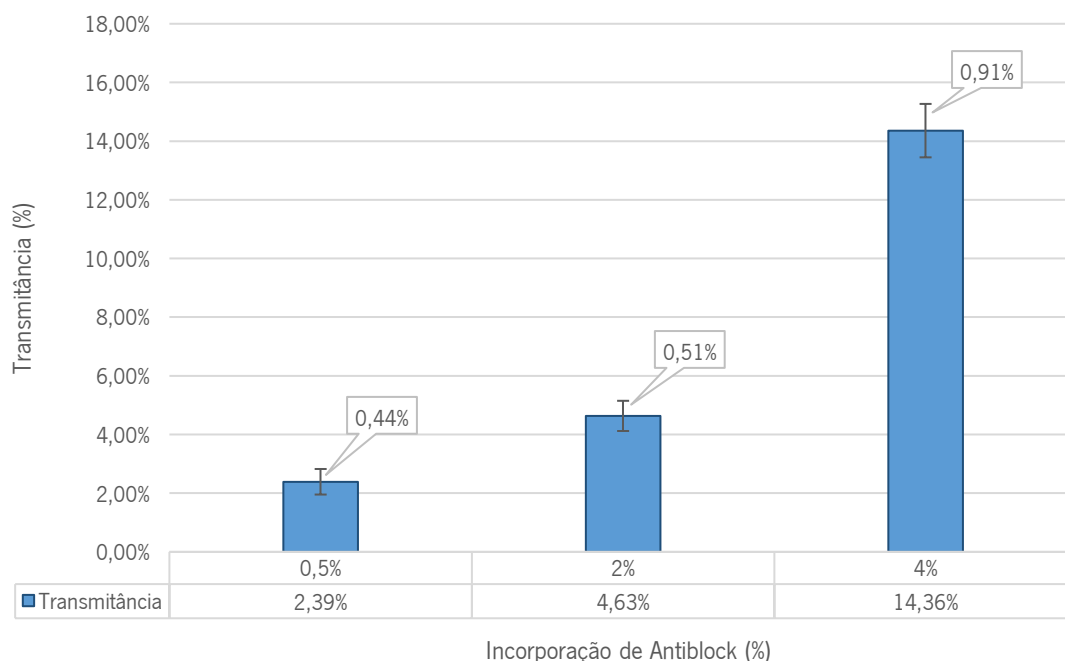


Figura 77 - Influência da percentagem de *antiblock* na transmitância.

Examinando os resultados obtidos é possível aferir que com o aumento da percentagem de incorporação de *antiblock* existe um aumento da transmitância luminosa, sendo esse efeito mais acentuado na passagem de 2 para 4%. Isto deve-se ao maior número de partículas com um índice de refração diferente, provocando uma maior difusão da luz à medida que esta viaja no interior da amostra. Este efeito pode ainda ser exacerbado caso a mistura não se encontre nas condições ótimas, resultando em aglomerados deste aditivo que proporcionam uma difusão superior. Estes resultados comprovaram que a aditivação com substâncias cujo índice de refração difere do índice da matriz polimérica resulta numa perda de transparência.

5.2.2. RISCO CONTÍNUO NA DIREÇÃO DE EXTRUSÃO

Os riscos na direção de extrusão são não conformidades visuais que, por norma, tem origem num componente da linha de extrusão danificado ou devido a um fator externo à produção. Neste caso, enquanto decorrer a produção sem o acondicionamento ou substituição do componente danificado, o risco ocorre no mesmo local da folha [36, 134].

O componente danificado pode estar associado ao processo de extrusão, bem como a um dos processos auxiliares, sendo que quando o risco advém da extrusão, este é visível no fundido à saída da

fieira. Caso ocorra esta não conformidade mas o risco não se verifique à saída da fieira, a origem do problema encontra-se a jusante, no equipamento auxiliar [36, 134].

Na Figura 78 encontra-se exposto um risco contínuo na direção de extrusão.

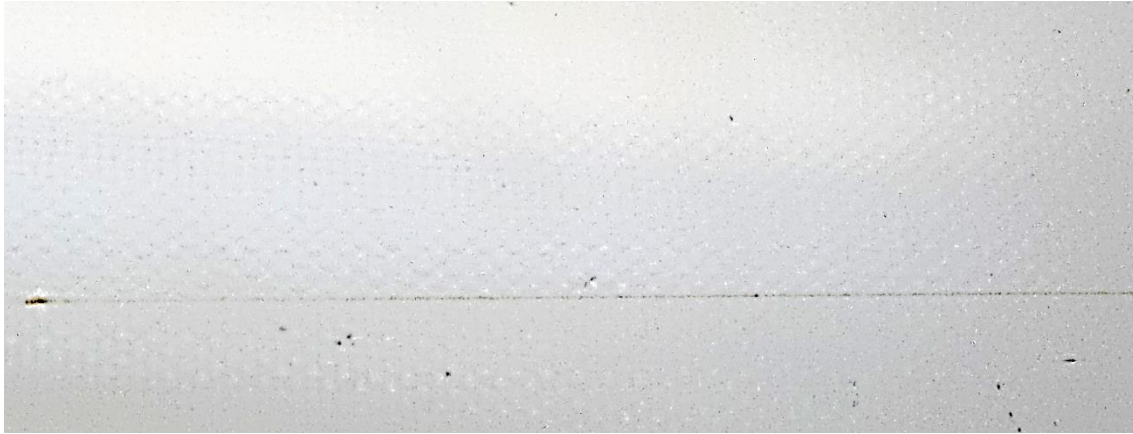


Figura 78 - Risco longitudinal presente na superfície da folha.

Esta não conformidade representa um problema para o cliente uma vez que este risco pode representar uma linha de fraqueza na folha, na qual pode ocorrer fratura no momento da enformação da embalagem. Existindo a correta formação da embalagem desejada, o risco contínuo que se encontrava na folha permanece na embalagem, reduzindo o seu aspeto estético.

5.2.2.1. CAUSAS

Esta não conformidade ocorre devido à presença de algo físico na linha de extrusão, pelo que as causas apontadas consideram principalmente fatores que originam a presença desse fator. Desta forma, consideraram-se três causas para o aparecimento desta não conformidade.

Incrustados: Contaminações na linha de extrusão, podendo estas ser de origem interna e externa [38].

Contaminações internas têm um vasto leque de origens possíveis, tais como material remanescente duma produção anterior, poeiras introduzidas com o reciclado ou, em casos extremos, acabamento superficial de metal que se solte do equipamento devido a desgaste. Estas contaminações podem ficar alojadas dentro da fieira caso as dimensões da contaminação não permitam a sua passagem pela abertura da fieira, causando um risco no fundido ou a formação de uma linha de soldadura que se manifesta como risco [134, 139].

Contaminações externas que provocam riscos contínuos na folha são, por norma, provenientes de acumulação de material no exterior dos lábios da feira, como se encontra ilustrado na Figura 79.

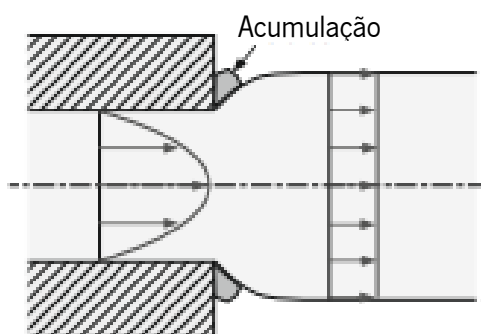


Figura 79 - Representação da acumulação de material nos lábios da feira. Adaptada de [28].

Polímeros higroscópicos como o PET, ou seja, polímeros que atraem e, consequentemente, absorvem a humidade devido ao grupo polar presente na sua composição, libertam voláteis que podem conter produtos da degradação por hidrólise. A condensação desses produtos nos lábios da feira gera contaminações que podem levar à criação da não conformidade em estudo [75, 98, 148, 149].

Imperfeição dos lábios da feira: Riscos profundos na superfície da folha podem ser provocados por danos nos lábios da feira, sendo que o risco verifica-se na superfície da folha que contacta diretamente com o lábio danificado [38].

Cilindros da calandra e/ou rolos de puxo sujos e/ou danificados: Uma marca a todo o perímetro de um cilindro da calandra pode originar um risco contínuo, dado que a superfície da folha é uma reprodução da superfície do cilindro. Isto deve-se ao facto de o polímero possuir mobilidade molecular quando contacta com os cilindros da calandra, em conjunto com a pressão que estes cilindros exercem sobre o material. Os rolos de puxo marcam o material a frio devido a pressão que estes fazem sobre o material [28, 31, 38].

5.2.2.2. AÇÕES CORRETIVAS

Uma forma rápida de verificar se a não conformidade provém da extrusora ou de um processo auxiliar passa por visualizar se o risco se encontra no fundido à saída da feira. No caso de este já se encontrar visível nessa zona as ações corretivas a serem utilizadas são aquelas que atuam na feira, explicitadas na sequência seguinte:

1. Verificar a existência de acumulação de material nos lábios da fieira.

- Os lábios da fieira devem ser limpos com recurso a uma ferramenta com dureza inferior à do material que constitui a fieira, como por exemplo, latão ou bronze.

2. Aumentar a abertura da fieira para permitir a saída do infundido.

- A dimensão do infundido pode não permitir que este saia pela abertura da fieira, sendo assim necessário aumentar a abertura da fieira, de modo a facilitar a sua passagem. Contudo, ao efetuar esta ação corretiva é necessário ter cuidado com os cilindros da calandra, uma vez que o infundido pode danificar a sua superfície.

3. Verificar a existência de danos nos lábios da fieira.

- Na eventualidade de um ou ambos os lábios da fieira estarem danificados, esta deve ser retirada para sofrer um condicionamento, uma vez que, neste caso, é uma ação imperativa na resolução desta não conformidade.

4. Limpeza da fieira.

- A limpeza da fieira é a última ação corretiva a ponderar uma vez que para a efetuar é necessário parar a produção, o que tem custos associados bastante elevados.

Caso não se verifique o risco no fundido à saída da fieira, este origina nos equipamentos auxiliares. Posto isto, investiga-se a existência de sujidade ou marcas nos cilindros da calandra ou nos rolos de puxo, devendo estes ser limpos ou polidos consoante o caso [38].

CAPÍTULO 6 - CASOS DE ESTUDO

De forma a proceder à validação prática das ações corretivas explicitadas anteriormente, bem como da sua aplicabilidade no mundo industrial, procedeu-se à análise de quatro casos de estudo a produções reais. Estes estudos tinham por base reclamações do cliente para as produções com a mistura GPPS/HIPS e, para o caso do PET, a ocorrência de não conformidades decorrentes da produção para consumo interno.

Inicia-se a exposição com os casos de estudo referentes à mistura GPPS/HIPS.

6.1. CASO DE ESTUDO 1

Um cliente efetuou uma reclamação a duas bobines constituídas pela mistura de GPPS/HIPS com a mesma espessura e largura. Na reclamação o cliente alegou que, aquando da termoformação das bobines em questão, estas não se mantinham no sistema de guiamento da termoformadora, ou seja, alegou que a folha saía das guias utilizadas para a transportar ao longo da máquina. Sabe-se internamente que este problema, por norma, tem por base a presença de flecha na folha em questão.

Posto isto, estudou-se a presença desta não conformidade, bem como de ondulação e de empeno, verificando que estes se encontravam efetivamente fora de especificação, como demonstrado na Tabela 11, bem como no Anexo N -.

Tabela 11 - Medição efetuada às bobines reclamadas.

Bobines com reclamações	Quantidade devolvida (kg)	Ondulação (mm)	Flecha (mm)	Empeno (mm)
		≤ 30	≤ 10	≤ 20
2	16	115 ± 35	19 ± 6	65 ± 10

Uma vez que se tratavam de dois casos pontuais numa produção de grande escala, rapidamente se equacionou que a causa do problema seria um desalinhamento no início da produção da bobine, ou seja, a folha não se encontrava alinhada com o sistema de guiamento do bobinador. Teorizou-se que a causa para esse desalinhamento poderia ser resultado da inexperiência do operador nesta etapa do processo, sendo que esta teoria tornou-se ainda mais relevante quando se constatou que o operador responsável por esta produção possuía menos de um ano de experiência.

Ponderou-se a redução do valor da especificação do alinhamento como forma de reduzir a probabilidade de erro humano. No entanto, esta hipótese foi descartada dado que o desperdício gerado seria elevado, uma vez que a retificação de um enrolamento incorreto pode atrasar o enrolamento de outras bobines e, assim, gerar uma quantidade de desperdício bastante elevada.

Desta forma, uma vez que o principal fator desta reclamação é a componente humana, optou-se por ações de sensibilização dos operadores para a correta colocação da folha, assim como formações mais longas aos novos operadores. No entanto, como medida preventiva optou-se pela colocação de anéis de guiamento, apresentados na Figura 80, cujo objetivo é impedir que existam desalinhamentos na bobinagem e, como resultado, flecha.

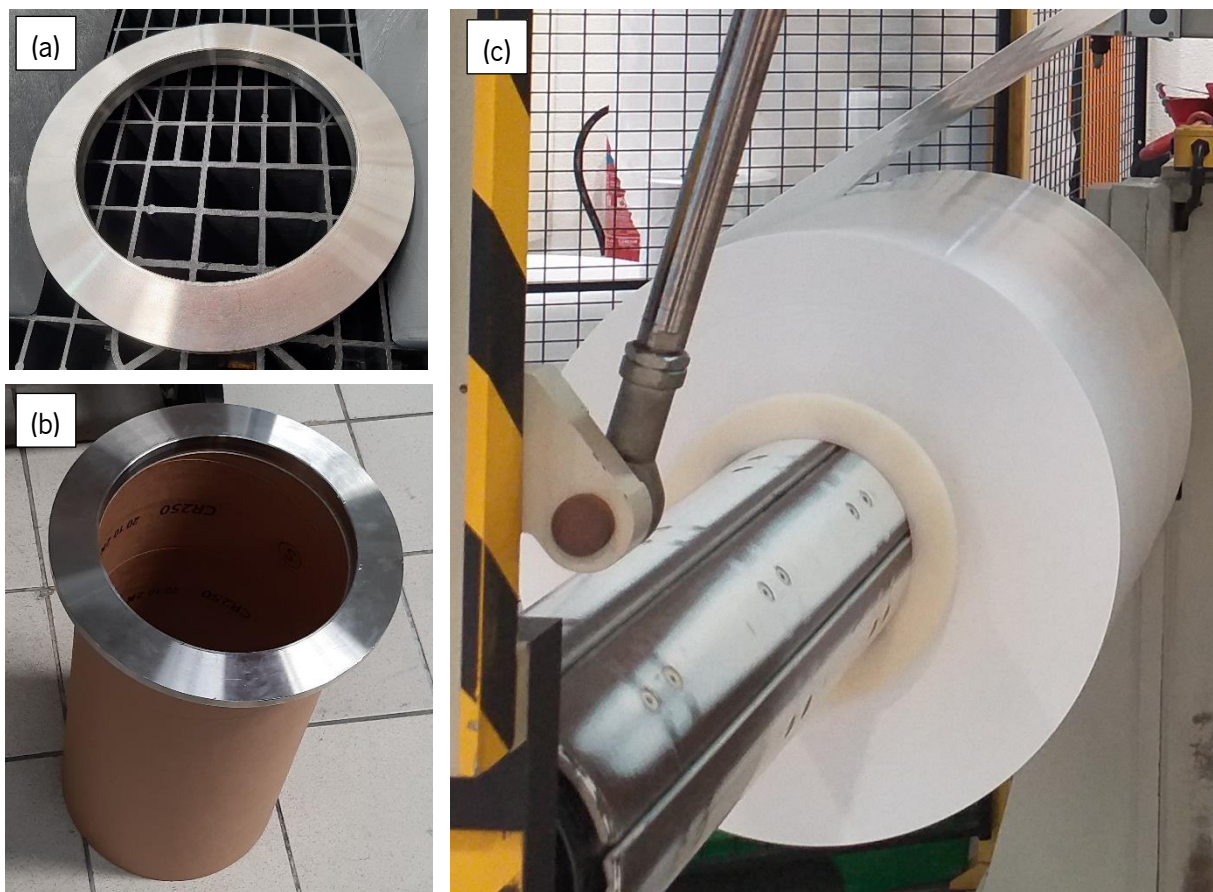


Figura 80 - Anéis de guiamento utilizados para corrigir a flecha em (a), em (b) o seu posicionamento em relação ao rolo de cartão e em (c) a bobinagem com recurso a estes anéis.

Para proceder à confirmação da eficiência da medida preventiva, produziram-se, com as condições habituais, cabeços com 3 e 8 horas de estágio, uma vez que já se tinham demonstrado representativos no passado, e de bobines com 40 horas de estágio, como forma de confirmar os resultados obtidos com o cabeço.

Após o estágio, procedeu-se a medição das não conformidades nos cabeços, bem como nas bobines, cujos resultados se encontram demonstrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Comparação das não conformidades em estudo antes e depois da medida preventiva.

	Sem anéis de guiamento			Com anéis de guiamento		
	Ondulação	Flecha	Empeno	Ondulação	Flecha	Empeno
Especificação (mm)	≤ 30	≤ 10	≤ 20	≤ 30	≤ 10	≤ 20
Cabeços com 3 horas de estágio	$14,0 \pm 14,0$	$7,5 \pm 0,5$	$31,5 \pm 3,5$	$0,0 \pm 0,0$	$2,0 \pm 0,0$	$15,5 \pm 0,5$
Cabeços com 8 horas de estágio	$45,0 \pm 17,0$	$11,0 \pm 1,0$	$31,5 \pm 3,5$	$14,5 \pm 0,5$	$4,0 \pm 1,0$	$35,0 \pm 0,0$
Bobines com 40 horas de estágio	$67,0 \pm 23,0$	$14,5 \pm 3,5$	$56,5 \pm 23,5$	$23,0 \pm 5,0$	$4,5 \pm 0,5$	$38,5 \pm 1,5$

Efetuando a comparação entre a produção sem e com anéis de guiamento pode-se verificar uma redução dos valores das não conformidades sobre as quais estes anéis possuem um maior efeito, ou seja, da ondulação e flecha, estando estas dentro de especificação para os cabeços, bem como para as bobines. É também possível verificar uma redução da variabilidade das medições efetuadas, uma vez que o desvio padrão que associado é efetivamente menor. É de notar que existe uma redução no valor do empeno entre a produção sem e com anéis. Associa-se esta redução à tensão mais uniforme com que a folha é tracionada ao longo da linha e, como resultado, à maior tensão e melhor contacto com os cilindros da calandra.

Estas reduções comprovam que a utilização de anéis de guiamento é eficiente, não só como medida preventiva, mas também como ação corretiva, podendo ser utilizada para corrigir flecha e ondulação que esta gera, validando assim as indicações dadas na secção anterior para estas não conformidades.

Apesar de não ser o motivo principal da reclamação, procurou-se entender qual a causa do empeno verificado nas bobines com reclamação e como o solucionar. Para tal, propôs-se uma redução da temperatura do cilindro três da calandra, de acordo com o explicitado na secção 5.1.2 e subsecções, numa tentativa de contrariar o empeno causado mecanicamente com um empeno induzido termicamente. As novas condições de processamento encontram-se expostas na Figura 81.

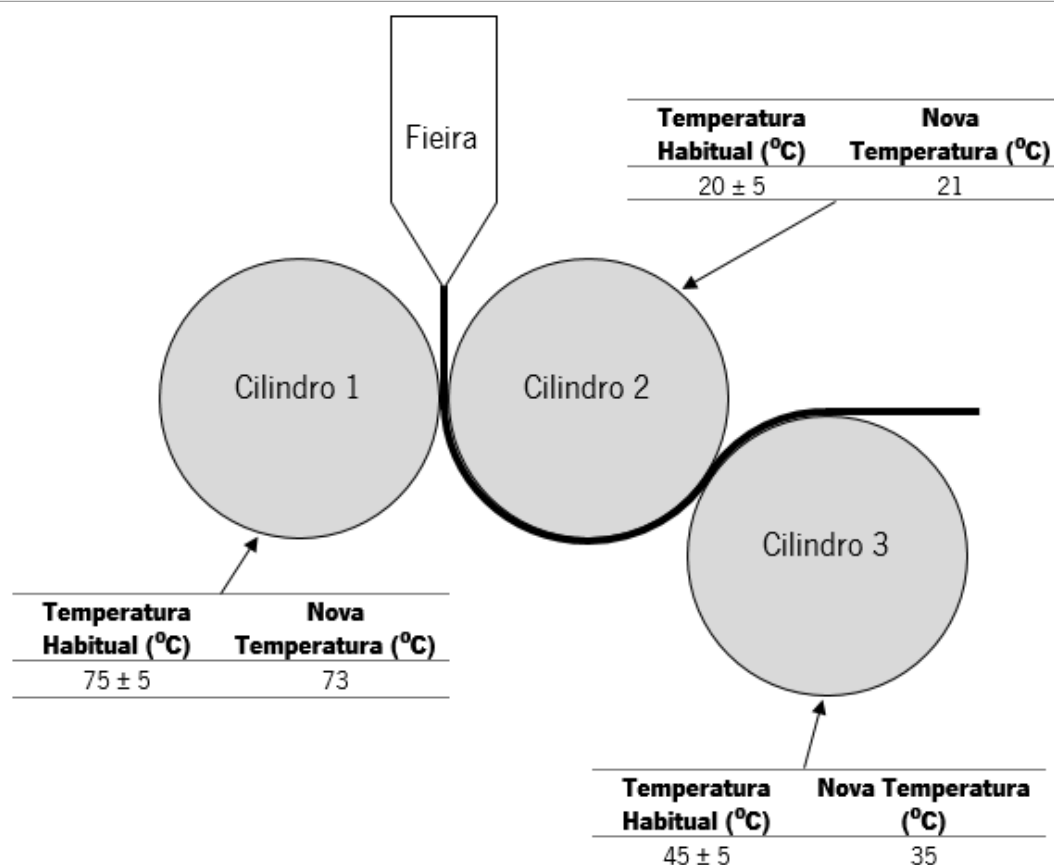


Figura 81 - Condições de processamento utilizadas em busca do solucionamento do empeno no caso de estudo 1.

Estas temperaturas originaram um empeno térmico de 5.21 milímetros, na direção contrária ao empeno induzido mecanicamente.

De forma a verificar o impacto deste empeno térmico no empeno total, produziram-se cabeços com 3 e 8 horas de estágio e bobines com 40 horas de estágio com as novas condições de processamento, assim como com condições habituais. Os resultados das duas produções encontra-se exposto na Tabela 13. É de notar que ambas as produções ocorreram com os anéis de guiamento.

Tabela 13 - Valores das não conformidades em análise numa produção normal e com as novas condições de processamento.

Não Conformidade	Produção normal			Com empeno térmico		
	Ondulação	Flecha	Empeno	Ondulação	Flecha	Empeno
Especificação (mm)	≤ 30	≤ 10	≤ 20	≤ 30	≤ 10	≤ 20
Cabeços com 3 horas de estágio	0 ± 0	2 ± 0	15,5 ± 0,5	20 ± 5	1 ± 1	13 ± 0
Cabeços com 8 horas de estágio	14,5 ± 0,5	4 ± 1	35 ± 0	17 ± 3	3 ± 1	18 ± 1
Bobines com 40 horas de estágio	23 ± 5	4,5 ± 0,5	38,5 ± 1,5	23,5 ± 6,5	4 ± 2	19,5 ± 0,5

Como se pode verificar através da análise da tabela, o empeno reduz significativamente com a ação corretiva efetuada, entrando no valor especificado. Esta redução indica que o empeno imposto à folha pelas temperaturas dos cilindros da calandra se encontra efetivamente a combater o empeno verificado nas bobines do cliente e que a ação corretiva é eficiente na retificação do empeno.

Contudo, é de notar que a ondulação para o cabeço com três horas de estágio e empeno térmico apresenta um valor bastante superior à produção normal. Uma vez que os valores dessa não conformidade para o cabeço com 8 horas de estágio, assim como para a bobine, são semelhantes para as duas produções, assume-se que se tratou de um caso pontual.

6.2. CASO DE ESTUDO 2

Um cliente efetuou uma reclamação referente a trinta e seis bobines, nas quais alegou a presença de no mínimo uma de três não conformidades, sendo elas a ondulação, o empeno e a flecha. O cliente declarou que não lhe era possível aproveitar as bobines na totalidade, argumentando que durante a termoformação, na fase de enformação, a folha rompia, dando origem a furos. As trinta e seis bobines em causa eram constituídas pela mistura de GPPS/HIPS com a mesma espessura e largura.

De forma a proceder à análise da proveniência das bobines em causa recorreu-se à etiqueta de identificação, pela qual se verificou que a fabricação dos lotes em questão deu-se em duas linhas de extrusão distintas, denominadas para o efeito como linha 1 e 2, logo causas que num diagrama de *Ishikawa* recaem na categoria da máquina são menos prováveis.

A reclamação abrangeu bobines da esquerda e da direita, sendo esta distinção efetuada dado que a folha inicial é dividida na zona central pela medida definida previamente. Uma vez que as bobines de ambos os lados e de ambas as linhas de extrusão originaram ondulação, a probabilidade de isto se dever às lâminas de corte é reduzida.

Esta reclamação compreendeu também bobines produzidas com e sem rolo de cartão entre a bobine e o mandril, sendo que sem o rolo de cartão o número de reclamações é superior, uma vez que a ausência desse rolo dificulta o correto alinhamento da folha a cada revolução no mandril (espiras).

Na Tabela 14 encontra-se um resumo dos pontos apresentados anteriormente. É de notar que não foi possível identificar em qual das linhas de extrusão se manufacturaram quatro das bobines pelas devido à inexistência de etiqueta de identificação.

Tabela 14 - Sumário da análise da proveniência das bobines.

Bobines com reclamações	Nº de bobines Linha 1		Nº de bobines Linha 2		Com rolo cartão	Sem rolo cartão	Quantidade devolvida total (kg)
	10		22				
36	6	4	9	13	8	28	1170
	Esquerda	Direita	Esquerda	Direita			

Terminada a análise à proveniência das bobines, procedeu-se ao estudo dos cabeços devolvidos pelo cliente, no qual se procedeu à medição das não conformidades previamente mencionadas na zona onde o cliente alega não conseguir processar a folha, bem como nos últimos metros do cabeço, ou seja, na primeira zona a ser bobinada.

Uma verificação preliminar aos cabeços devolvidos revelou demasiada tensão das espiras nas imediações da zona onde o cliente efetuou a reclamação. No entanto, no fim do cabeço a tensão apresentada era reduzida, provocando o desalinhamento das espiras. Este diferencial não é prática da empresa e não se verificou noutras produções, o que indica que existe “enrolamento forçado” no cliente. O “enrolamento forçado” pode-se dever a um atrito demasiado elevado do desbobinador do cliente, aplicando tensão na folha quando esta é puxada pelas guias da termoformadora. Na Figura 82 encontra-se exemplificado o resultado deste efeito nos cabeços devolvidos.



Figura 82 - Desalinhamento das espiras devido a diferenciais de tensão.

A medição das não conformidades efetuada consoante os testes explicitados anteriormente revelou que, na zona onde o cliente alega não conseguir processar a folha, apenas casos pontuais se

encontravam fora de especificação. No entanto, na primeira zona a ser bobinada, verificam-se as não conformidades assinaladas na maioria dos cabeços. A comparação entre a zona onde o cliente alega não ser possível processar a folha e a primeira zona a ser bobinada encontra-se demonstrada na Figura 83.

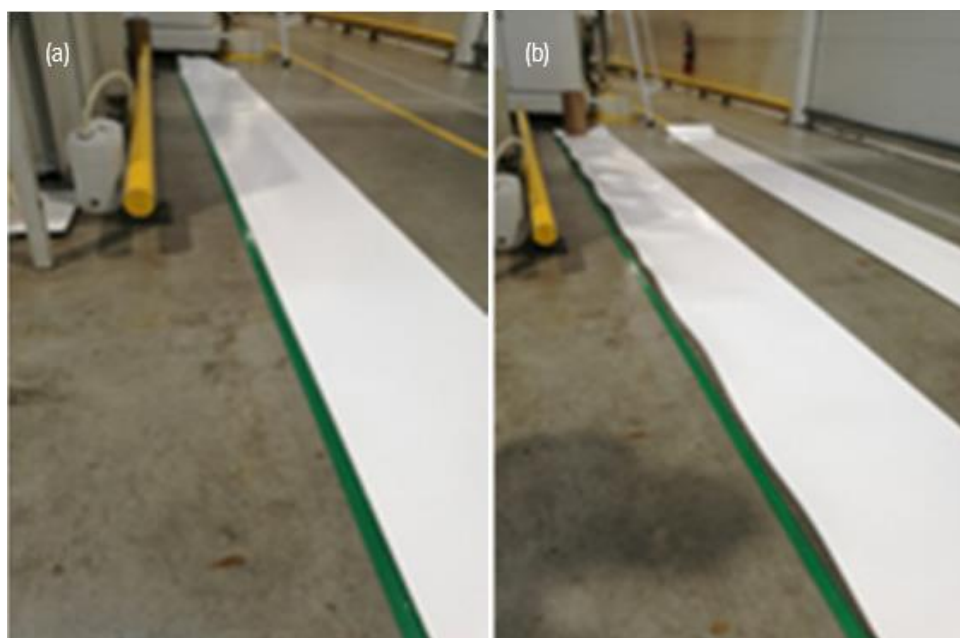


Figura 83 - Comparação entre a zona de devolução (a) e fim de bobine (b).

Na Tabela 15 encontram-se as medições para os cabeços com e sem rolo de cartão e no Anexo O - encontra-se a comparação direta entre a zona de devolução e o fim de bobine, bem como o valor medido para cada uma das não conformidades em questão nessas zonas.

Tabela 15 - Sumário das medições efetuadas aos cabeços

Não conformidade	Especificação (mm)	Zona da devolução			Fim do cabeço	
		Nº de cabeços não conformes		Média (mm)	Nº de cabeços não conformes	Média (mm)
Ondulação	≤ 30	Com Rolo	2	65,00 ± 25,00	7	75,14 ± 19,74
		Sem Rolo	4	49,25 ± 8,17	25	70,64 ± 27,01
Empeno	≤ 20	Com Rolo	4	26,50 ± 3,57	7	30,43 ± 3,74
		Sem Rolo	6	27,17 ± 5,64	25	31,00 ± 5,85
Flecha	≤ 10	Com Rolo	1	20,00 ± 0,00	3	16,00 ± 4,55
		Sem Rolo	2	15,50 ± 1,50	8	19,88 ± 4,91

Como se pode verificar através da tabela, a incidência das não conformidades é bastante superior nos casos onde a bobinagem se efetuou sem a presença do rolo de cartão, independentemente da zona. Contudo, apesar da maior incidência das não conformidades sem o rolo de cartão, os valores registados para a ondulação sem o rolo de cartão são inferiores para ambas as zonas. Para o empeno o valor registado apresenta um aumento desprezável nas duas zonas analisadas, devido ao maior desvio padrão apresentado sem o rolo de cartão. No caso da flecha existiu uma inversão dos valores obtidos quando se efetuou a comparação direta entre as duas zonas em análise.

Posto isto, procurou-se definir quais as causas preliminares das não conformidades verificadas na reclamação. Como explicitado anteriormente, o “enrolamento forçado” tem origem no desenrolamento da bobine por parte do cliente, ponderando-se assim que o diferencial de tensão verificado não se deva à bobinagem, mas sim ao processo do cliente.

O cliente produz com o material em análise em três máquinas. Numa das máquinas aproveitou-se o material na totalidade, não apresentando qualquer entrave à produção. Outra máquina apenas conseguiu produzir desenrolando a bobine de forma invertida, uma vez que com o desenrolamento normal não era possível termoformar com sucesso. Na última máquina não é possível efetuar a produção. Esta diferença entre a produção das três máquinas fortalece a teoria de que o problema se encontra na parte do cliente. Contudo, uma investigação às máquinas do cliente, com intuito de ajudar na resolução do problema, não revelou qualquer problema nas mesmas. É de notar que, aquando desta investigação, não existia laboração, logo não foi possível verificar o processo em andamento e, consequentemente, não podendo assim excluir a possibilidade de o problema ser das máquinas do cliente.

Desta forma, atribui-se a flecha e ondulação à tensão não uniforme e incorreta com que os cabeços devolvidos se encontravam. No entanto, procedeu-se à colocação de anéis de guiamento, apresentados anteriormente na Figura 80, uma vez que estes se mostraram efetivos no combate a estas não conformidades no caso de estudo anterior.

O empeno considerou-se um problema de produção interno, visto que esta não conformidade, na generalidade dos casos, tem origem térmica. Deste modo, definiu-se que se iria proceder a uma redução da temperatura do cilindro três da calandra, como demonstrado na Figura 84, como havia sido efetuado no caso de estudo anterior. Para tal, decorreriam duas produções de bobines com 168 horas (uma semana) de estágio, como forma de representar melhor o tempo entre a produção e a utilização

pelo cliente. Estas duas produções ocorreram na linha de extrusão 1 com condições de processamento habituais excetuando no cilindro três, onde a temperatura se reduziu a temperatura utilizada.

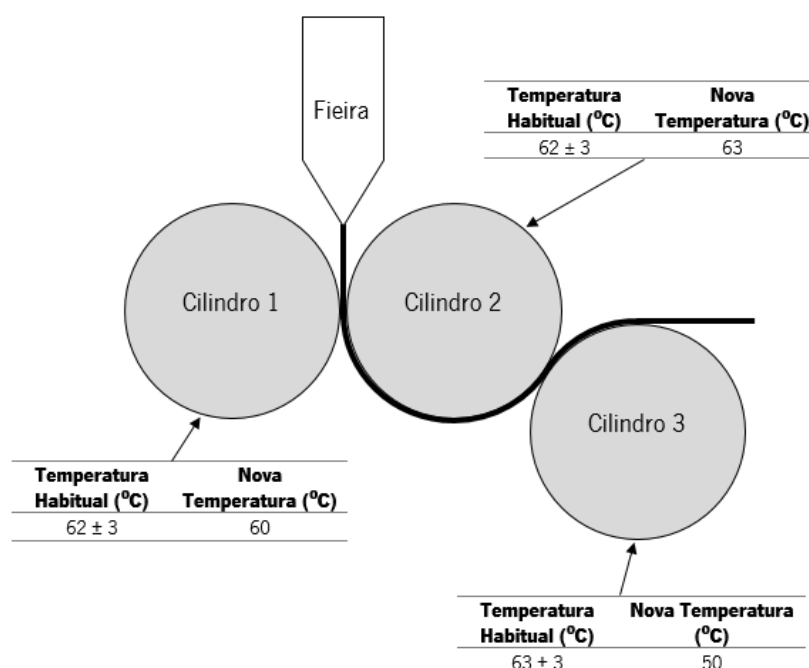


Figura 84 - Representação das temperaturas utilizadas nas duas produções de teste.

As novas temperaturas permitiram a produção de uma folha com empeno térmico de 10.57 milímetros, fruto do maior arrefecimento promovido pelo cilindro número três.

De seguida, procedeu-se à medição das não conformidades, apontadas como problemáticas na primeira fase, nas bobines produzidas com este empeno térmico. É de notar que a produção destas bobines ocorreu sem a utilização de anéis de guiamento, dado que se pretendia estudar apenas o efeito da redução da temperatura no cilindro três. Os resultados encontram-se expostos na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores das não conformidades em bobines decorrentes duma produção normal e com as novas condições de processamento.

Não Conformidade	Ondulação	Flecha	Empeno	Condições Normais (Esquerda)	Empeno Térmico (Esquerda)
Especificação (mm)	≤ 30	≤ 10	≤ 20		
Condições Normais Bobine Esquerda	20	3	40		
Condições Normais Bobine Direita	80	6	35		
Empeno Térmico Bobine Esquerda	45	9	18		
Empeno Térmico Bobine Direita	48	10	5		

A medição do empeno em ambos os cabeços evidenciou uma melhoria em termos desta não conformidade no cabeço retirado com empeno térmico, como seria de esperar, comprovando que a ação tomada como forma de minimizar o empeno é de facto eficiente no combate a esta não conformidade.

No caso da flecha, é possível verificar que, apesar de se encontrar dentro de especificação, ocorre um aumento ligeiro para os valores retirados, podendo este aumento ligeiro acontecer devido à variabilidade natural do processo e não da ação corretiva. Relativamente à ondulação, ambas as bobines com a ação corretiva estão fora de especificação, o que apenas acontece numa das bobines com as condições habituais. Contudo, a média dos valores retirados para esta especificação com e sem ação corretiva são muito semelhantes, o que indica que também esta oscilação se deve a flutuações naturais do processo produtivo

6.3. CASO DE ESTUDO 3

Um cliente requereu folhas de PET com uma determinada formulação, de forma a continuar a produzir o produto que já lançou no mercado. Contudo, as amostras que lhe foram enviadas não correspondiam ao nível de transparência que este desejava.

Uma vez que a folha requer um pré-aquecimento a 75°C para proceder ao seu corte e embalagem, ponderou-se que esta temperatura poderia estar a promover a cristalização do PET e, como explicitado na secção 5.2.1.1, a retirar a transparência pretendida. Posto isto, procurou-se verificar o efeito da temperatura de aquecimento nesta propriedade, através do corte a várias temperaturas, incluindo sem temperatura, e subsequente envio ao cliente para avaliação da transparência. Estes ensaios revelaram que a temperatura de aquecimento é, de facto, um parâmetro relevante para a obtenção de amostras com o nível de transparência desejado, dado que esta influencia a transparência das folhas de PET, como demonstrado na Figura 85 e no Anexo P -.

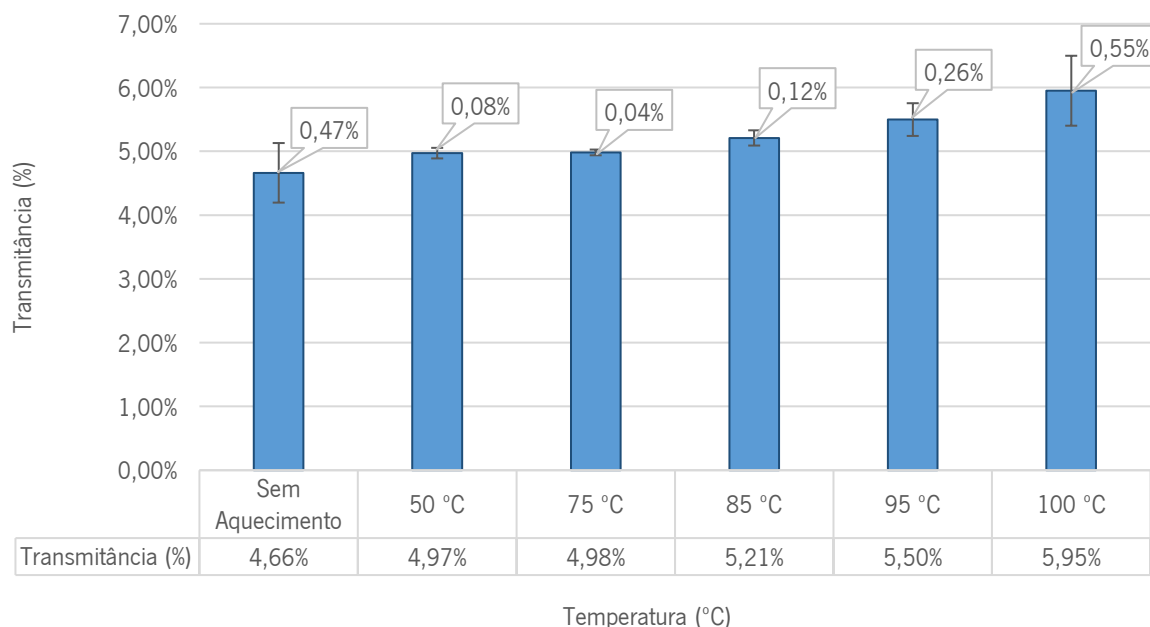


Figura 85 - Influência da temperatura de aquecimento na transmitância das amostras.

Analisando o gráfico obtido é possível verificar até aos 75°C não ocorrem grandes variações a nível da transmitância, uma vez que o desvio padrão desvaloriza a diferença entre os valores obtidos. Contudo, a partir dos 85°C é possível verificar um aumento da transmitância medida, dado que a esta temperatura o material encontra-se acima de T_g , possuindo desta forma mobilidade para se reorganizar e compactar nas estruturas cristalinas, descritas anteriormente, que provocam uma redução da transparência.

O cliente aprovou, em termos de transparência, as amostras onde não foi efetuado aquecimento e onde este ocorreu a 50°C, ambas com uma transmitância inferior a 5% em ambos os casos, pelo que se considera que seja este o valor máximo de transmitância permitida. Todavia, o corte das amostras a estas temperaturas não se encontrava como pretendido, ou seja, a qualidade do corte com menor aquecimento é inferior e não corresponde aos padrões de qualidade exigidos pelo cliente.

Posto isto, propôs-se o desenvolvimento de uma nova formulação com uma menor percentagem de incorporação de *antiblock*, uma vez que se considerou que este estaria a funcionar como ponto de nucleação, promovendo a cristalização e, como tal, a formação de centros difusores da luz incidente que reduzem a transparência da folha, como explicitado na secção 5.2.1.1. Para efeitos comparativos testou-se de igual modo uma formulação com uma percentagem de *antiblock* mais elevada, encontrando-se os resultados obtidos para a transparência das formulações, após um aquecimento de 75°C, expostos na Figura 86 e no Anexo Q -.

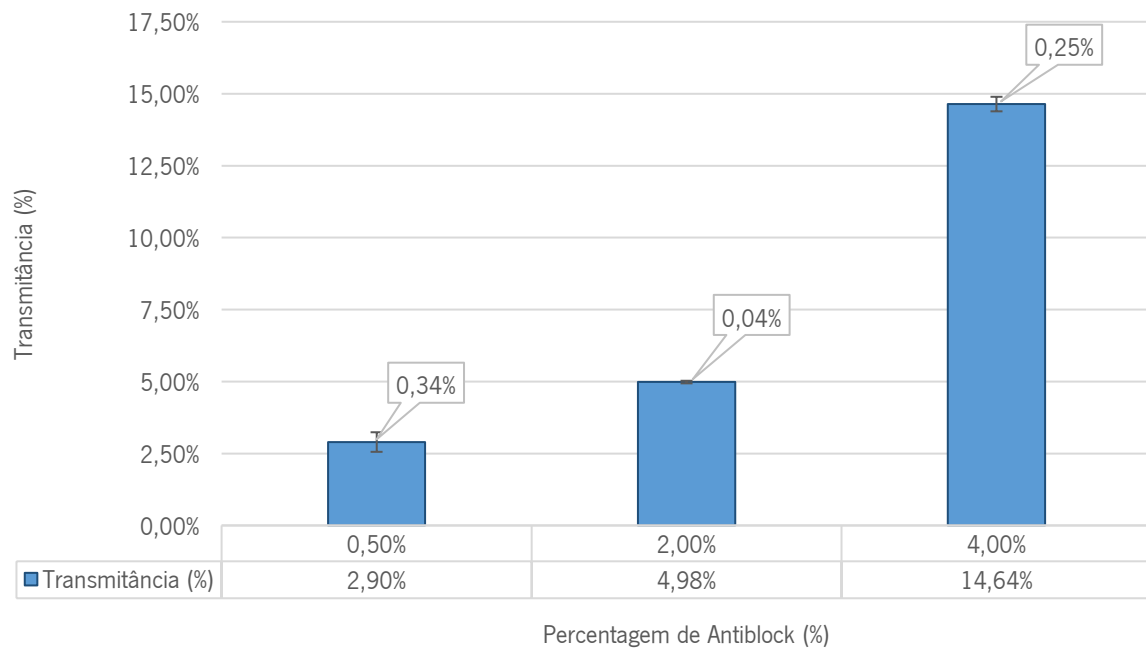


Figura 86 - Influência da percentagem de *antiblock* na transmitância das amostras aquecidas a 75°C.

Como é possível observar, a transparência das amostras é fortemente afetada pela percentagem de *antiblock* incorporada, existindo um aumento acentuado na transmitância medida para a amostra de teste com 4% de *antiblock*. Esta nova formulação de 0.5% de *antiblock* foi aprovada pelo cliente, quer a nível da transparência das folhas que por ela eram formadas, bem como a nível do corte.

6.4. CASO DE ESTUDO 4

No decorrer de uma produção de PET translúcido verificou-se a existência de um risco longitudinal contínuo apresentado na Figura 87.

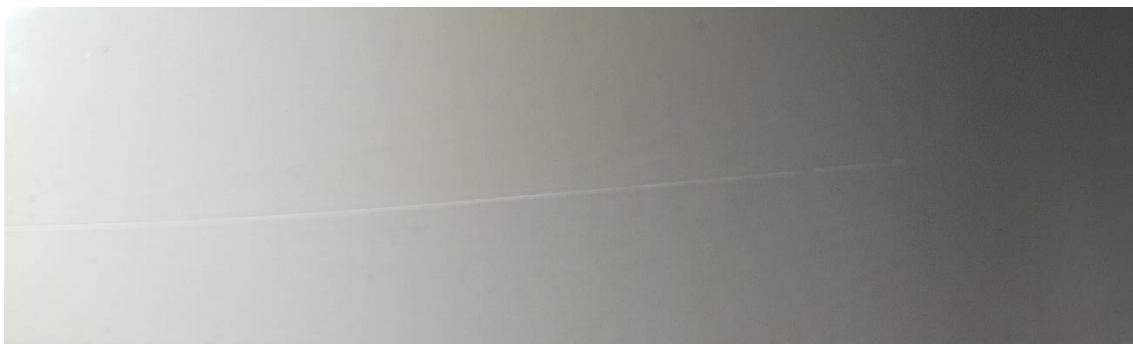


Figura 87 - Risco ocorrido na produção de PET translúcido.

Este risco ocorreu desde o início da produção, pelo que uma acumulação de oligómeros resultante da degradação do PET nos lábios da fieira foi descartada do lote de possíveis causas desta não conformidade.

Como mencionado na análise desta não conformidade, deve-se investigar se o risco é visível à saída da fieira ou apenas numa zona mais avançada da linha de extrusão, sendo que desta investigação verificou-se que este risco era visível imediatamente após a fieira. Isto indica que o risco tem origem no processo de extrusão. Durante uma limpeza dos cilindros da calandra devido a uma substância que adere a estes, semelhante a uma cera, proveniente do *antiblock*, não se detetou quaisquer sujidade ou dano nos mesmos, o que suporta a possibilidade de o risco originar no processo de extrusão.

Desta forma, ponderou-se que a origem desta não conformidade seria uma contaminação interna alojada no bloco distribuidor, dado que se efetuou a limpeza da fieira antes do início da produção.

Após algum tempo de produção, a presença deste risco originava o aparecimento de um efeito semelhante a um “espinhado” na direção de extrusão, efeito este que se verificou como sendo cíclico, ocorrendo com intervalos de 13 a 15 segundos. O risco e o efeito espinhado que este origina encontram-se apresentados na Figura 88.

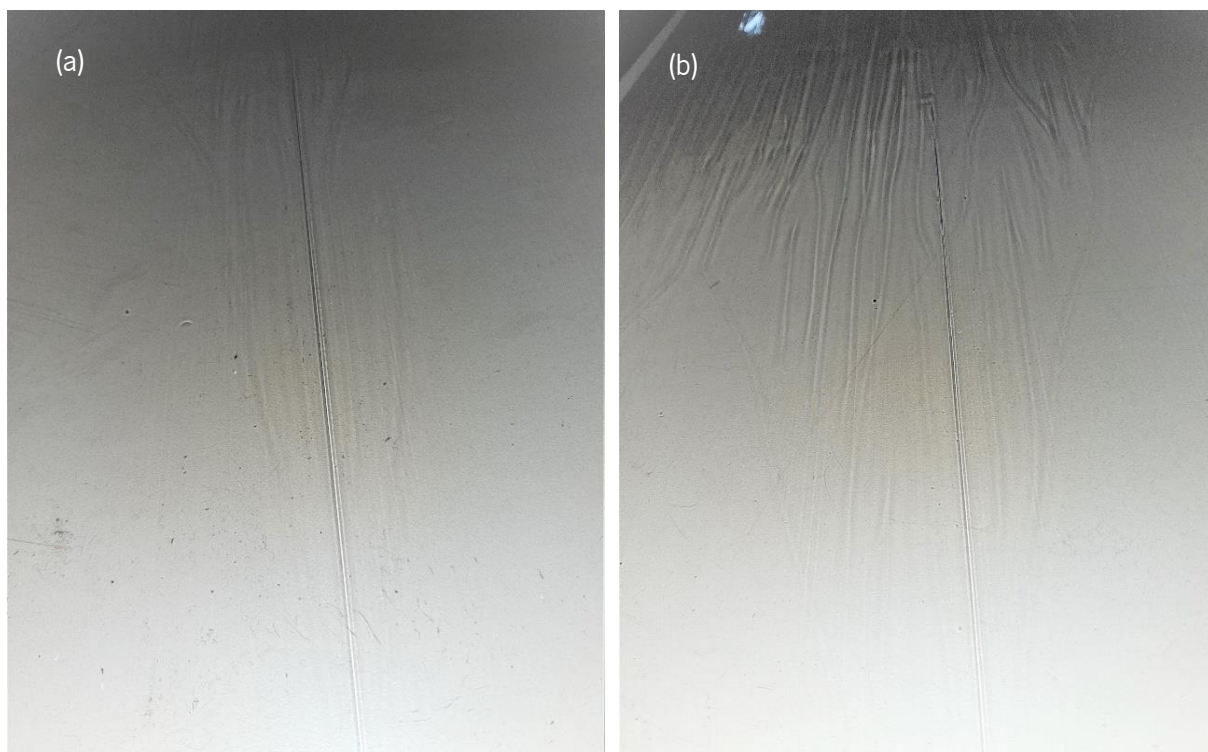


Figura 88 - Folha de PET onde em (a) é possível visualizar o risco e o início do efeito espinhado e em (b) se visualiza este mesmo efeito totalmente desenvolvido.

Como medidas preventivas até a paragem da produção de PET, diminuiu-se a temperatura programada para o bloco distribuidor e aumentou-se a linha de compensação. No entanto, como mencionado na secção 2.3.3, este aumento vai provocar um incremento dos níveis de orientação da folha, que se traduz numa maior contração na fase de aquecimento da termoformação. No PET esta linha tem o efeito adicional de reduzir a transparência da folha produzida, uma vez que uma maior orientação promove a cristalização. Esta ação provocou ainda o aparecimento de linhas curvas quase impercetíveis no sentido transversal à extrusão.

No decorrer de uma ação de manutenção alterou-se a configuração do bloco distribuidor recorrendo a uns parafusos que este possui, dado que estes parafusos acumulam algum fundido numa zona de estagnação designada “zona morta”, demonstrado na Figura 89, que poderia originar uma linha de soldadura que se traduziria por um risco visível em caso de desagregação.

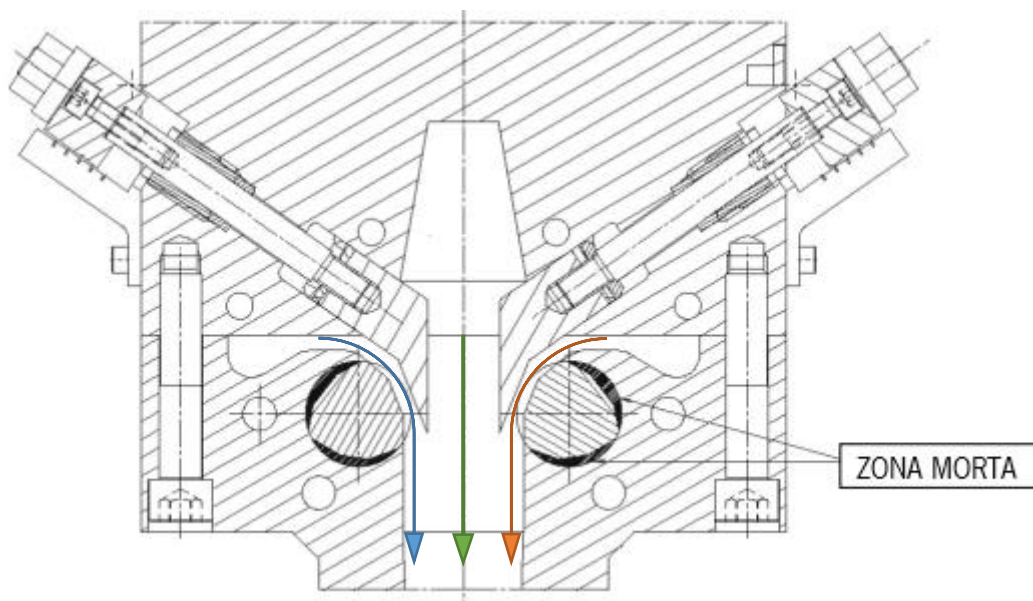


Figura 89 - Configuração do bloco distribuidor e representação dos caminhos dos diferentes materiais e da "zona morta".

Introduziu-se também uma vareta de cobre na fieira de forma a tentar deslocar a possível contaminação e, deste modo, identificar a origem da não conformidade. Todavia, esta não conformidade manteve-se, sendo que o risco contínuo permaneceu no mesmo local, revelando que as ações tomadas foram infrutíferas. Posto isto, uma vez que o risco se manteve no mesmo local após a utilização da vareta de cobre, considerou-se que a raiz do problema seriam danos na fieira. No final da produção verificou-se que a fieira se encontrava danificada, como se pode verificar na Figura 90, sendo os danos

encontrados responsáveis pelo risco verificado na folha. Após o acondicionamento da fieira cessou a ocorrência desta não conformidade.



Figura 90 - Fieira danificada responsável pelo risco observado na folha de PET.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

A metodologia proposta neste trabalho proporcionou uma identificação mais célere das possíveis causas para as não conformidades estudadas, uma vez que se efetuou uma comparação direta entre a última produção em especificação e a produção atual. Esta comparação permitiu investigar alterações no processo produtivo entre os dois momentos de produção, no sentido de descobrir se essas alterações estariam na origem da não conformidade.

Esta metodologia permitiu ainda reduzir o leque de causas possíveis e um maior foco nas soluções pertinentes através da comparação dos grandes grupos de causas presentes nos diagramas de *Ishikawa* com outras linhas de extrusão, restringindo as causas iniciais àquelas que poderiam estar de facto na origem da não conformidade.

Ao longo da realização deste trabalho, concluiu-se que um fator de extrema importância na obtenção de uma folha de elevada qualidade da mistura GPPS/HIPS é o nível de orientação molecular e o seu equilíbrio transversal, bem como ao longo da espessura. Como tal, a fase de arrefecimento revelou-se como a mais crítica do processo, dada a sua influência na presença e equilíbrio dessa orientação e congelamento da mesma, sendo crucial a otimização de todo o processo e não só da fase de arrefecimento para que seja mitigada qualquer possibilidade de existência de não conformidades. Todavia, as limitações das técnicas experimentais utilizadas dificultaram a obtenção do valor dessa orientação, sendo, em etapas futuras, necessário recorrer a técnicas mais avançadas para determinação de mesma e, por sua vez, da causa das não conformidades onde estas limitações impediram a análise.

Relativamente às folhas de PET, apesar de também ocorrerem não conformidades analisadas para a mistura de GPPS/HIPS, conclui-se que as não conformidades referentes à aparência eram de elevada importância. Isto é especialmente pertinente para a transparência, dado que esta, em conjunto com o ciclo de reciclabilidade, é uma das razões do elevado uso de PET apesar das suas desvantagens inerentes. Desta forma, as não conformidades de PET encontravam-se extremamente focadas nas suas propriedades óticas e de apresentação ao consumidor, sendo estas características extremamente dependentes das condições de processamento e condições do equipamento utilizado para a produção destas folhas. Estas não conformidades deviam-se principalmente à rápida cristalização do PET e consequente perda de propriedades óticas desejadas.

Os casos de estudo analisados permitiram implementar, numa realidade industrial, as ações corretivas equacionadas e proceder à sua validação prática, obtendo resultados satisfatórios para a empresa, bem como para o cliente.

Para etapas futuras deste trabalho propõe-se a validação da utilização do guia de produção criado nesta fase pelos operadores das linhas de extrusão, bem como a verificação do seu impacto na eficiência do processo de extrusão, através dos vários indicadores de eficiência existentes como, por exemplo, o OEE (*Overall Equipment Effectiveness*).

Após esta validação e verificação da eficiência, propõe-se expandir as metodologias empregues neste documento a não conformidades de outros processos de fabrico utilizados na empresa, nomeadamente a termoformação e laminação, bem como alargar o conhecimento adquirido no PET. Esta expansão terá como objetivo alargar a sistematização da compreensão e resposta a não conformidades, de forma a melhorar a eficiência da empresa, assim como para reduzir o custo associado a não conformidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-
- [1] Intraplás S.A., “Página Oficial da Intraplás S.A.,” 2019. <http://www.intraplas.pt/> (accessed Sep. 17, 2019).
- [2] Intraplás S.A., “Manual da Qualidade.” .
- [3] Intraplás S.A., “Política da Qualidade.” p. 3, 2019.
- [4] T. A. Osswald and G. Menges, *Material Science of Polymers for Engineers*, Terceira E. Cincinnati, USA: Hanser Publications Inc., 2012.
- [5] M. Ščetar, I. Barukčić, M. Kurek, K. L. Jakopović, R. Božanić, and K. Galić, “Packaging Perspective of Milk and Dairy Products,” *Mljekarstvo*, vol. 69, no. 1, pp. 3–20, 2019, doi: 10.15567/mljekarstvo.2019.0101.
- [6] A. G. da Cruz, J. de A. F. Faria, and A. G. F. Van Dender, “Packaging System and Probiotic Dairy Foods,” *Food Res. Int.*, vol. 40, no. 8, pp. 951–956, 2007, doi: 10.1016/j.foodres.2007.05.003.
- [7] I. S. Arvanitoyannis, “Totally and Partially Biodegradable Polymer Blends Based on Natural and Synthetic Macromolecules : Preparation , Physical Properties , and Potential as Food Packaging Materials,” *J. Macromol. Sci. , Part C Polym. Rev.*, vol. 1797, no. March 2015, pp. 37–41, 2007, doi: 10.1081/MC-100101420.
- [8] A. W. Chin, “Polymers for Innovative Food Packaging,” Worcester Polytechnic Institute, 2010.
- [9] S. T. Sam, M. A. Nuradibah, H. Ismail, N. Z. Noriman, and S. Ragunathan, “Recent advances in polyolefins/natural polymer blends used for packaging application,” *Polym. Plast. Technol. Eng.*, vol. 53, no. 6, pp. 631–644, 2014.
- [10] V. Siracusa, P. Rocculi, S. Romani, and M. Dalla Rosa, “Biodegradable Polymers for Food Packaging: A Review,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 19, no. 12, pp. 634–643, 2008.
- [11] D. Raheem, “Application of Plastics and Paper as Food Packaging Materials - An Overview,” *Emirates J. Food Agric.*, vol. 25, no. 3, pp. 177–188, Nov. 2017, doi: <https://doi.org/10.9755/ejfa.v25i3.11509>.
- [12] S. A. Ashter, *Thermoforming of Single and Multilayer Laminates: Plastic Films Technologies, Testing, and Applications*, Primeira E. Kidlington, UK: William Andrew, 2014.
- [13] K. Petersen, G. Bertelsen, M. Lawther, M. B. Olsen, and N. H. Nilsson, “Potential of Biobased Materials for Food Packaging,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 52–68, 1999.
- [14] PlasticsEurope, “Plastics - the Facts 2019,” 2019. [Online]. Available: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>.
- [15] D. V. Rosato, “Sheet,” in *Extruding Plastics: A Practical Processing Handbook*, Primeira E., Dordrecht, The Netherlands: Springer Science & Business Media, 2013, pp. 376–417.
- [16] J. G. Khan, R. S. Dalu, and S. S. Gadekar, “Defects in Extrusion Process and Their Impact on Product Quality,” *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 3, no. 3, pp. 187–194, 2014.
- [17] P. M. Patil and D. B. Sadaphale, “A Study of Plastic Extrusion Process and its Defects,” *Int. J. Latest Technol. Eng. Manag. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 9, pp. 13–20, 2018.

-
- [18] R. Kent, "Statistical process control (SPC)," in *Quality Management in Plastics Processing: Strategies, targets, techniques and tools*, Primeira E., Kidlington, UK: Elsevier Ltd., 2016, pp. 125–182.
 - [19] I. O. for Standardization, *ISO 9000:2015 Quality Management Systems – Fundamentals and Vocabulary*, Quarta Edi. 2015.
 - [20] M. N. Subramanian, *The Basics of Troubleshooting in Plastics Processing: An Introductory Practical Guide*, Primeira E. John Wiley & Sons, Inc. and Scrivener Publishing LLC, 2011.
 - [21] R. Kent, "Introduction to quality management," in *Quality Management in Plastics Processing: Strategies, targets, techniques and tools*, Primeira E., Kidlington, UK: Elsevier Ltd., 2016, pp. 3–26.
 - [22] O. Prakash, "Defects in Multilayer Plastic Films I: Interface Defects in Extrusion," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 37, no. 1–2, pp. 7–11, 2006, doi: 10.1016/j.commatsci.2005.12.039.
 - [23] C. Rauwendaal, "Functional Process Analysis," in *Polymer Extrusion*, Quinta Edi., Cincinnati, USA: Hanser Publications Inc., 2014, pp. 256–508.
 - [24] K. P. Adewale, "The Effects of Processing Conditions on the Physical Properties of Extruded High Impact Polystyrene Sheets," *J. Plast. Film Sheeting*, vol. 16, no. 4, pp. 256–272, 2000, doi: 10.1106/TEY6-G9UT-23C3-CCNP.
 - [25] N. J. Macauley, E. M. A. Harkin-Jones, and W. R. Murphy, "The Influence of Extrusion Parameters on the Mechanical Properties of Polypropylene Sheet," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 38, no. 4, pp. 662–673, 1998.
 - [26] S. Engelmann, R. Salmang, and H. R. Dänzer, "Production of Semifinished Products, Extrusion, and Coextrusion," in *Advanced Thermoforming: Methods, Machines and Materials, Applications and Automation*, Primeira E., Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 12–27.
 - [27] C. Rauwendaal, "Effective Troubleshooting of Extrusion Problems," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1779, no. 1, p. 30021, Oct. 2016, doi: 10.1063/1.4965491.
 - [28] C. Rauwendaal, "Troubleshooting Extruders," in *Polymer Extrusion*, Quinta Edi., Cincinnati, USA: Hanser Publications Inc., 2014, pp. 763–859.
 - [29] G. Campbell and M. Spalding, "Introduction to Troubleshooting the Extrusion Process," in *Analyzing and Troubleshooting Single-Screw Extruders*, Primeira E., Cincinnati, USA: Hanser Publications, Inc., 2013, p. 407 476.
 - [30] G. Campbell and M. Spalding, "Single-Screw Extrusion: Introduction and Troubleshooting," in *Analyzing and Troubleshooting Single-Screw Extruders*, Primeira E., Cincinnati, USA: Hanser Publications, Inc., 2013, pp. 1–22.
 - [31] J. Goff, T. Whelan, and D. DeLaney, *The Dynisco Extrusion Processors Handbook*, Segunda Ed. Massachusetts, USA: Dynisco, 2000.
 - [32] K. Ishikawa, *Guide To Quality Control*, Primeira E. Tokyo, Japan: Asian Productivity Organization, 1976.
 - [33] R. Kent, "Tools for quality management and improvement," in *Quality Management in Plastics Processing: Strategies, targets, techniques and tools*, Primeira E., Kidlington, UK: Elsevier Ltd.,
-

-
- 2016, pp. 197–226.
- [34] D. V. Rosato, “Extrusion Machine and Line,” in *Extruding Plastics: A Practical Processing Handbook*, Primeira E., Dordrecht, The Netherlands: Springer Science & Business Media, 2013, pp. 54–227.
 - [35] D. V. Rosato, “Extrusion,” in *Plastics Processing Data Handbook*, Segunda Ed., London, UK: Chapman & Hall, 1997, pp. 209–315.
 - [36] C. Rauwendaal, “How to Troubleshoot Extrusion Problems,” in *Understanding Extrusion*, Primeira E., Cincinnati, USA: Hanser Publications Inc., 2018, pp. 134–174.
 - [37] H. F. Giles Jr, E. M. Mount III, and J. R. Wagner Jr., “Problem Solving,” in *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, Primeira E., Norwich, USA: William Andrew Inc., 2005, pp. 221–226.
 - [38] H. F. Giles Jr, E. M. Mount III, and J. R. Wagner Jr., “Troubleshooting Sheet Extrusion,” in *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, Primeira E., Norwich, USA: William Andrew Inc., 2005, pp. 281–294.
 - [39] Z. Tadmor and C. G. Gogos, *Principles of Polymer Processing*, Segunda Ed. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
 - [40] A. Rajkumar, L. L. Ferrás, C. Fernandes, O. S. Carneiro, and J. M. Nóbrega, “Guidelines For Balancing the Flow in Extrusion Dies: The Influence of the Material Rheology,” *J. Polym. Eng.*, vol. 38, no. 2, pp. 197–211, 2018.
 - [41] J. Vlachopoulos and D. Strutt, “The Role of Rheology in Polymer Extrusion,” in *New Technology for Extrusion Conference*, 2003, p. 25.
 - [42] J. Scheirs, “Historical Overview of Styrenic Polymers,” in *Modern Styrenic Polymers: Polystyrenes and Styrenic Copolymers*, Primeira E., Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 3–24.
 - [43] H. Belofsky, *Plastics: Product Design and Process Engineering*, Primeira E. Cincinnati, USA: Hanser Publications Inc., 1995.
 - [44] B. J. Meister and C. J. Cummings, “Commercial Processes for the Manufacture of Polystyrene,” in *Modern Styrenic Polymers: Polystyrenes and Styrenic Copolymers*, Primeira E., Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 45–72.
 - [45] G. Erhard, *Designing With Plastics*, Primeira E. Cincinnati, USA: Hanser Gardner Publications, Inc., 2006.
 - [46] J. M. Marinelli and L. J. Lee, “Experimental Analysis of Plastic Sheet Extrusion,” *Adv. Polym. Technol. J. Polym. Process. Inst.*, vol. 5, no. 4, pp. 239–256, 1985, doi: <https://doi.org/10.1002/adv.1985.060050402>.
 - [47] H. F. Giles Jr, E. M. Mount III, and J. R. Wagner Jr., “Sheet and Cast Film,” in *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, Primeira E., Norwich, USA: William Andrew Inc., 2005, pp. 435–452.
 - [48] J. R. Wagner Jr. and S. B. Marks, “Introduction,” in *Multilayer Flexible Packaging*, Segunda Ed., Kidlington, UK: Elsevier Inc., 2016, pp. 3–13.

-
- [49] W. J. Schrenk and T. Alfrey Jr., "Coextruded Multilayer Polymer Films and Sheets," in *Polymer Blends: Volume 2*, Primeira E., New York, USA: Academic Press, Inc., 1978, p. 129.
 - [50] B. A. Morris, "Troubleshooting Coextrusion Film Problems by Considering Process–Property Relationships," *J. Plast. Film Sheeting*, vol. 29, no. 2, pp. 189–203, 2013.
 - [51] J. Gámez-Pérez, O. O. Santana, A. Gordillo, and M. L. Maspocho, "Evaluation of the Fracture Behavior of Multilayered Polypropylene Sheets Obtained by Coextrusion," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 47, no. 9, pp. 1365–1372, Sep. 2007, doi: 10.1002/pen.20821.
 - [52] H. F. Giles Jr, E. M. Mount III, and J. R. Wagner Jr., "Coextrusion Applications," in *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, Primeira E., Norwich, USA: William Andrew Inc., 2005, pp. 373–389.
 - [53] Innova, "Manual de Extrusão." Innova, p. 37, [Online]. Available: <http://innova.com.br/arquivos/documentos/relatorio/artigo/56785d393bb51.pdf>.
 - [54] A. Riley, "Plastics Manufacturing Processes for Packaging Materials," in *Packaging Technology: Fundamentals, Materials and Processes*, Primeira E., A. Emblem and H. Emblem, Eds. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2012, pp. 310–360.
 - [55] M. J. Kirwan and J. W. Strawbridge, "Plastics in Food Packaging," in *Food Packaging Technology*, Primeira E., vol. 5, Boca Raton, USA: CRC Press LLC., 2003, pp. 174–240.
 - [56] C. Rauwendaal, "Die Design," in *Polymer Extrusion*, Quinta Edi., Cincinnati, USA: Hanser Publications Inc., 2014, pp. 653–696.
 - [57] H. F. Giles Jr, E. M. Mount III, and J. R. Wagner Jr., "Polymer Rheology," in *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, Primeira E., Norwich, USA: William Andrew Inc., 2005, pp. 187–193.
 - [58] R. Francis and A. Sivadas, "Introduction," in *Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications*, Primeira E., R. Francis, Ed. Kottayam, India: Wiley-VCH, 2016, pp. 1–10.
 - [59] R. A. Malloy, "Design for Enhanced Recyclability and Sustainability," in *Plastic Part Design for Injection Molding*, Segunda Ed., Cincinnati, USA: Hanser Publications Inc., 2010, pp. 483–534.
 - [60] H. F. Giles Jr, E. M. Mount III, and J. R. Wagner Jr., "Reprocessing," in *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, Primeira E., Norwich, USA: William Andrew Inc., 2005, pp. 523–524.
 - [61] D. V. Rosato, D. P. Di Mattia, and D. V. Rosato, *Designing With Plastics and Composites: A Handbook (Softcover Reprint of the Original 1st ed. 1991 Edition)*, Primeira E. New York, USA: Springer Science & Business Media, 2013.
 - [62] D. R. Bain, "Thermoforming Technologies For The Manufacture of Rigid Plastics Packaging," in *Technology of Plastics Packaging for the Consumer Market*, Primeira E., Sheffield, UK: Sheffield Academic Press, 2001, pp. 146–159.
 - [63] J. Sherwood, J. Clark, T. Farmer, L. Herrero-Davila, and L. Moity, "Recirculation: A new concept to drive innovation in sustainable product design for bio-based products," *Molecules*, vol. 22, no. 1, p. 48, 2016.
 - [64] P. G. Lafleur and B. Vergnes, "Production of Films and Sheets," in *Polymer Extrusion*, Primeira
-

-
- E., Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2014, pp. 245–303.
- [65] J. Vlachopoulos, N. Polychronopoulos, S. Tanifuji, and J. P. Müller, “Flat Film and Sheet Dies,” in *Design of Extrusion Forming Tools*, Primeira E., O. S. Carneiro and J. M. Nóbrega, Eds. Sheffield, UK: Smithers Rapra Technology Ltd., 2012, pp. 113–140.
- [66] D. V. Rosato, “Die Design and Performance,” in *Extruding Plastics: A Practical Processing Handbook*, Primeira E., Dordrecht, The Netherlands: Springer Science & Business Media, 2013, pp. 228–282.
- [67] GMA Machinery Enterprise CO. Ltd., “Where Can Order High Quality Sheet Extrusion Die? GMA Machinery Is Your First Choice.” <https://www.gmatw.com/plate-sheet-extrusion-die.html>.
- [68] G. Oliver, “Extrusion Coating Dies and Feedblocks.” Extrusion Dies Industries LLC, p. 48, 2010.
- [69] O. Prakash and A. Moitra, “Defects in Multilayer Plastic Films II: Streak Formation in Extruded Films,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 37, no. 1, pp. 12–14, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.12.005>.
- [70] D. V. Rosato, “Flat Film,” in *Extruding Plastics: A Practical Processing Handbook*, Primeira E., Dordrecht, The Netherlands: Springer Science & Business Media, 2013, pp. 349–375.
- [71] D. Acierno, L. Di Maio, and G. Cuccurullo, “Analysis of Temperature Fields in Film Casting,” *J. Polym. Eng.*, vol. 19, no. 2, pp. 75–94, 1999, doi: <https://doi.org/10.1515/polyeng-1999-0202>.
- [72] S. Shiromoto, “The Mechanism of Neck-in Phenomenon in Film Casting Process,” *Int. Polym. Process.*, vol. 29, no. 2, pp. 197–206, Apr. 2014, doi: 10.3139/217.2784.
- [73] S. Shiromoto, Y. Masutani, M. Tsutsubuchi, Y. Togawa, and T. Kajiwara, “A Neck-in Model in Extrusion Lamination Process,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 50, no. 1, pp. 22–31, Jan. 2010, doi: 10.1002/pen.21502.
- [74] L. Hilliou and J. A. Covas, “Production and Processing of Polymer-Based Nanocomposites,” in *Nanomaterials for Food Packaging: Materials, Processing Technologies, and Safety Issues*, Primeira E., Elsevier Inc., 2018, pp. 111–146.
- [75] E. M. Mount III, “Extrusion Processes,” in *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials*, Primeira E., Kidlington, UK: Elsevier Inc., 2011, pp. 227–266.
- [76] H. F. Giles Jr, E. M. Mount III, and J. R. Wagner Jr., “Extrusion Process,” in *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, Primeira E., Norwich, USA: William Andrew Inc., 2005, pp. 1–8.
- [77] V. C. Barroso, S. P. Ribeiro, and J. M. Maia, “Unusual Extensional Behavior of a Polystyrene/HIPS Blend,” *Rheol. acta*, vol. 42, no. 5, pp. 483–490, 2003.
- [78] M. F. Martin, J. P. Viola, and W. J. R., “Preparation, Properties and Applications of High-impact Polystyrene,” in *Modern Styrenic Polymers: Polystyrenes and Styrenic Copolymers*, Primeira E., Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 247–280.
- [79] G. Chatterjee and S. Prasad, “Polystyrene: Properties and it’s Applications in Sensing Plataforms,” in *Polystyrene: Properties, performance and applications*, Primeira E., New York, USA: Nova Science Publishers, Inc., 2011, pp. 119–141.
-

-
- [80] N. Niessner and H. Gausepohl, "Polystyrene and Styrene Copolymers – An Overview," in *Modern Styrenic Polymers: Polystyrenes and Styrenic Copolymers*, Primeira E., Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2003, pp. 25–42.
- [81] C. A. Harper and E. M. Petrie, *Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia*, Primeira E. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [82] A. Emblem, "Plastics properties for packaging materials," in *Packaging Technology: Fundamentals, Materials and Processes*, Primeira E., A. Emblem and H. Emblem, Eds. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2012, pp. 287–309.
- [83] W. Brostow, "Mechanical Properties," in *Physical Properties of Polymers Handbook*, Segunda Ed., J. E. Mark, Ed. Cincinnati, USA: Springer Science & Business Media, 2007, pp. 423–445.
- [84] S. Engelmann, R. Salmang, and H. R. Dänzer, "Production of Refrigerator Liners," in *Advanced Thermoforming: Methods, Machines and Materials, Applications and Automation*, Primeira E., Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 48–60.
- [85] P. C. Kwong, A. Menawat, P. Ng, and K. T. Okamoto, "Biaxially Oriented Polystyrene Film," 5643664, Jul. 01, 1997.
- [86] F. Soriano, G. Morales, and R. D. de León, "Recycling of High Impact Polystyrene in Coextruded Sheet: Influence of the Number of Processing Cycles on the Microstructure and Macroscopic Properties," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 46, no. 12, pp. 1698–1705, Dec. 2006, doi: 10.1002/pen.20652.
- [87] V. Grassi, M. M. Forte, and D. F., "Aspectos Morfológicos e Relação Estrutura-Propriedades de Poliestireno de Alto Impacto," *Polímeros Ciência e Tecnol.*, vol. 11, no. 3, pp. 158–168, Sep. 2001, doi: 10.1590/S0104-14282001000300016.
- [88] J. K. Fink, "High Impact Poly(Styrene)," in *Handbook of engineering and specialty thermoplastics, Volume 1: Polyolefins and Styrenics*, Primeira E., vol. 1, Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010, pp. 269–296.
- [89] T. Vu-Khanh, "Fracture Behaviour of High-impact Polystyrene and Acrylonitrile–Butadiene–Styrene," in *Modern Styrenic Polymers: Polystyrenes and Styrenic Copolymers*, Primeira E., Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 633–663.
- [90] D. Whisnant, "Polymer Chemistry: Mechanical Properties," 2020. [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_\(Materials_Science\)/Polymer_Chemistry/Polymer_Chemistry%3A_Mechanical_Properties](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Polymer_Chemistry/Polymer_Chemistry%3A_Mechanical_Properties).
- [91] P. G. Lafleur and B. Vergnes, "Co-rotating Twin-Screw Extrusion," in *Polymer Extrusion*, Primeira E., Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2014, pp. 109–210.
- [92] L. A. Utracki, "Polymer Blends' Technology for Plastics Recycling," in *Frontiers in the Science and Technology of Polymer Recycling*, Primeira E., Dordrecht, The Netherlands: Springer Science & Business Media, 1998, pp. 123–152.
- [93] A.-M. M. Baker and J. Mead, "Thermoplastics," in *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites*, Quarta Ed., C. A. Harper, Ed. New York, USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2002, pp. 1–108.
-

-
- [94] L. Koester, S. Nemeth, and M. Koester, "Thermoforming & Die Cutting of Recycled/Virgin PET Sheet." Lavergne Group PETCO Division, p. 28.
 - [95] P. Balakrishnan and M. S. Sreekala, "Recycling of Plastics," in *Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications*, Primeira E., Kottayam, India: Wiley-VCH, 2016, pp. 115–140.
 - [96] J. E. Mark, Ed., *Polymer Data Handbook*, Primeira E. Oxford University Press, Inc., 1999.
 - [97] Z. Mekonnen, L. Incarnato, and L. Di Maio, "Migration Phenomena Analysis of Virgin PET/Recycled PET Multilayers Films," *Ann. Food Process. Preserv.*, vol. 1, no. 1, pp. 1008–1015, 2016.
 - [98] A. Elamri, K. Zdiri, O. Harzallah, and A. Lallam, "Progress in Polyethylene Terephthalate Recycling," in *Polyethylene Terephthalate: Uses, Properties and Degradation*, Primeira E., New York, USA: Nova Science Publishers, Inc., 2017, pp. 155–186.
 - [99] F. Awaja and D. Pavel, "Recycling of PET," *Eur. Polym. J.*, vol. 41, no. 7, pp. 1453–1477, Jul. 2005, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005.
 - [100] M. V. Pergal and M. Balaban, "Poly(ethylene terephthalate): synthesis and physicochemical properties," in *Polyethylene Terephthalate: Uses, Properties and Degradation*, Primeira E., New York, USA: Nova Science Publishers, Inc., 2017, pp. 1–102.
 - [101] R. J. Samuels, "Quantitative structural characterization of the mechanical properties of poly (ethylene terephthalate)," *J. Polym. Sci. Part A-2 Polym. Phys.*, vol. 10, no. 5, pp. 781–810, 1972.
 - [102] S. Engelmann, R. Salmang, and H. R. Dänzer, "PET in Thermoforming Applications," in *Advanced Thermoforming: Methods, Machines and Materials, Applications and Automation*, Primeira E., Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 211–226.
 - [103] G. Campbell and M. Spalding, "Introduction to Polymer Rheology for Extrusion," in *Analyzing and Troubleshooting Single-Screw Extruders*, Primeira E., Cincinnati, USA: Hanser Publications, Inc., 2013, pp. 57–108.
 - [104] H. C. Lau, S. N. Bhattacharya, and G. J. Field, "Melt Strength of Polypropylene: Its Relevance to Thermoforming," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 38, no. 11, pp. 1915–1923, 1998, doi: 10.1002/pen.10362.
 - [105] Y. Mubarak, P. J. Martin, and E. Harkin-Jones, "Effect of Nucleating Agents and Pigments on Crystallisation, Morphology, and Mechanical Properties of Polypropylene," *Plast. Rubber Compos. Process. Appl.*, vol. 29, no. 7, pp. 307–315, 2000.
 - [106] J. Throne, "Thermoforming," in *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials*, Primeira E., Kidlington, UK: Elsevier Inc., 2011, pp. 333–359.
 - [107] J. G. Drobny, "Selection of Manufacturing Methods," in *Tool and Manufacturing Engineers Handbook: Plastic Part Manufacturing*, Quarta Edi., Dearborn, USA: Society of Manufacturing Engineers, 1996, pp. 107–127.
 - [108] E. Harkin-Jones, N. J. Macauley, and W. R. Murphy, "Thermoforming of Polypropylene," in *Polypropylene: an A-Z reference*, Primeira E., Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2012, pp. 847–852.

-
- [109] B. Demirel, A. Yaraş, and H. Elçiçek, "Crystallization Behavior of PET Materials," *BAÜ Fen Bil. Enst. Derg. Cilt*, vol. 13, no. 1, pp. 26–35, 2011.
- [110] C. P. Rader and R. F. Stockel, "Polymer Recycling: An Overview," in *Plastics, Rubber, and Paper Recycling*, Primeira E., Washington DC, USA: American Chemical Society, 1995, pp. 2–10.
- [111] J. Leidner and G. Boden, "Separation Technologies," in *Frontiers in the Science and Technology of Polymer Recycling*, Primeira E., G. Akovali, C. A. Bernardo, J. Leidner, L. A. Utracki, and M. Xanthos, Eds. Dordrecht, The Netherlands: Springer Science & Business Media, 1998, pp. 301–332.
- [112] M. Ezrin, "Processing-Related Factors in Failure," in *Plastics Failure Guide*, Cincinnati, USA: Hanser Publications Inc., 2013, pp. 233–278.
- [113] G. L. Robertson, "Food Packaging and Shelf Life," in *Food Packaging and Shelf Life: A Practical Guide*, Primeira E., Boca Raton, USA: CRC Press, 2010, pp. 1–16.
- [114] D. Paraskevopoulou, D. S. Achilias, and A. Paraskevopoulou, "Migration of styrene from plastic packaging based on polystyrene into food simulants," *Polym. Int.*, vol. 61, no. 1, pp. 141–148, Jan. 2012, doi: 10.1002/pi.3161.
- [115] IARC, *Styrene, styrene-7,8-oxide, and quinoline*, vol. 121. Lyon, France, 2019.
- [116] L. E. Garver and G. L. Kimbrough, "System, method and apparatus for hot fill PET container," 5011648, Apr. 1991.
- [117] A. Ophir, S. Kenig, A. Shai, Y. Barka'ai, and J. Miltz, "Hot-fillable containers containing PET/PEN copolymers and blends," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 44, no. 9, pp. 1670–1675, Sep. 2004, doi: 10.1002/pen.20166.
- [118] R. A. Auras, S. P. Singh, and J. J. Singh, "Evaluation of oriented poly (lactide) polymers vs. existing PET and oriented PS for fresh food service containers," *Packag. Technol. Sci. An Int. J.*, vol. 18, no. 4, pp. 207–216, 2005.
- [119] D. W. Brooks and G. A. Giles, Eds., *PET packaging technology*. Canada, USA: Sheffield Academic Press Ltd, 2002.
- [120] R. Francis, G. P. Gopalan, and A. Sivadas, "Ecoprofiles of Recycled Polymers at a Glance," in *Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications*, Primeira E., R. Francis, Ed. Kottayam, India: Wiley-VCH, 2016, pp. 235–256.
- [121] O. for E. C. and Development, "Improving Plastics Management: Trends, Policy Responses, and the Role of International Co-operation and Trade," *OECD Environ. Policy Pap.*, no. 12, p. 24, 2018, doi: 10.1126/sciadv.1700782.
- [122] T. Maharana, Y. S. Negi, and B. Mohanty, "Review Article: Recycling of Polystyrene," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, vol. 46, no. 7, pp. 729–736, Jul. 2007, doi: 10.1080/03602550701273963.
- [123] S. Thakur, A. Verma, B. Sharma, J. Chaudhary, S. Tamulevicius, and V. K. Thakur, "Recent developments in recycling of polystyrene based plastics," *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 13, pp. 32–38, 2018.
- [124] U. F. & D. Administration, "Submissions on Post-Consumer Recycled (PCR) Plastics for Food-Contact Articles."
-

- <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/fdcc/index.cfm?set=RecycledPlastics&showAll=true&sort=Polymer&order=ASC&type=basic&search=>.
- [125] F. P. La Mantia and M. Vinci, "Recycling poly (ethyleneterephthalate)," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 45, no. 1, pp. 121–125, 1994.
- [126] A. Askadskii, M. Popova, T. Matseevich, and E. Afanasyev, "The Influence of the Degree of Crystallinity on the Elasticity Modulus of Polymers," *Adv. Mater. Res.*, vol. 864–867, pp. 640–643, Dec. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.864-867.640.
- [127] J. Oakland and R. Oakland, "Process problem solving and improvement," in *Statistical Process Control*, Sétima Edi., New York, USA: Routledge, 2019, pp. 265–300.
- [128] M. Aldaba Arévalo, J. Antó Roca, D. Cayuela Marín, and C. Morales, "Medida de la birrefringencia óptica en las fibras textiles. Parte 1. Demostración teórica," *Boletín Intexter*, vol. 130, pp. 57–62, 2006.
- [129] H. W. Starkweather Jr, P. Zoller, and G. A. Jones, "The heat of fusion of poly (ethylene terephthalate)," *J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed.*, vol. 21, no. 2, pp. 295–299, 1983.
- [130] M. S. Rabello and R. M. R. Wellen, "Estudo da cristalização a frio do poli (tereftalato de etileno)(PET) para produção de embalagens," *Rev. Eletrônica Mater. e Process.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–9, 2008.
- [131] R.-Y. Wu, L. D. McCarthy, and Z. H. Stachurski, "Tearing resistance of multi-layer plastic films," *Int. J. Fract.*, vol. 68, no. 2, pp. 141–150, 1994.
- [132] S. Engelmann, R. Salmang, and H. R. Dänzer, "Basics of Thermoforming and Thermoplastics," in *Advanced Thermoforming: Methods, Machines and Materials, Applications and Automation*, Primeira E., Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 5–11.
- [133] P. Sirevicius, "Sheet Extrusion Die Opening Restriction Device," 3,860,383, 1975.
- [134] H. F. Giles Jr, E. M. Mount III, and J. R. Wagner Jr., "Troubleshooting Extrusion Product Problems," in *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, Primeira E., Norwich, USA: William Andrew Inc., 2005, pp. 265–280.
- [135] M. Ezrin, "Failures Related to Design and Material Selection," in *Plastics Failure Guide*, Segunda Ed., Cincinnati, USA: Hanser Publications Inc., 2013, pp. 83–139.
- [136] K. M. B. Jansen, "Residual Stresses in Quenched and Injection Moulded Products," *Int. Polym. Process. J. Polym. Process. Soc.*, vol. 9, no. 1, pp. 82–89, Mar. 1994, doi: 10.3139/217.940082.
- [137] AZO Materials, "Understanding Drawn Fibers." <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=16014#> (accessed Dec. 09, 2019).
- [138] R. D. Smith, "Guidelines for Rolls Used in Web Handling," 2012, [Online]. Available: https://www.aimcal.org/uploads/4/6/6/9/46695933/smith_-_guidelines_for_rolls_used_in_web_handling_-_presentation.pdf.
- [139] F. Goffreda, A. Griff, L. Livinghouse, T. Walsh, and J. Scuralli, "Extrusion Equipment and Processing Techniques," in *Tool and Manufacturing Engineers Handbook: Plastic Part Manufacturing*, Quarta Edi., Dearborn, USA: Society of Manufacturing Engineers, 1996, pp. 166–

216.

- [140] Eralmak, "Heat Transfer Rolls." <http://www.eralmak.com/en/urunler.asp?kt=36> (accessed Nov. 05, 2019).
- [141] G. Stark, "Light," *Encyclopædia Britannica*, 2020. <https://www.britannica.com/science/light>.
- [142] C. Maier and T. Calafut, *Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook*, Primeira E. Norwich, USA: Plastics Design Library, 1998.
- [143] H. F. Giles Jr, E. M. Mount III, and J. R. Wagner Jr, "Polymer Structure," in *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, Primeira E., Norwich, USA: William Andrew Inc., 2005, pp. 179–186.
- [144] C. C. Ibeh, *Thermoplastic Materials: Properties, Manufacturing Methods and Applications*, Primeira E. Boca Raton, USA: Taylor & Francis Group, LLC., 2011.
- [145] E. A. Coleman, "Plastics Additives," in *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials*, Primeira E., Kidlington, UK: Elsevier Inc., 2011, pp. 419–428.
- [146] H. F. Giles Jr, E. M. Mount III, and J. R. Wagner Jr., "Troubleshooting Coextrusion," in *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, Primeira E., Norwich, USA: William Andrew Inc., 2005, pp. 411–423.
- [147] C. L. Werling, C. I. Chung, and T. M. Powell, "Shear Refining of Branched Low Density Polyethylene," in *SPE/ANTEC 1998 Proceedings*, 1998, vol. 3, pp. 76–80.
- [148] C. Rauwendaal, "Important Polymer Properties," in *Polymer Extrusion*, Quinta Edi., Cincinnati, USA: Hanser Publications Inc., 2014, pp. 191–255.
- [149] F. Ding and A. Giacomini, "Die Lines in Plastics Extrusion," *J. Polym. Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 1–40, Jan. 2000, doi: 10.1515/POLYENG.2000.20.1.1.

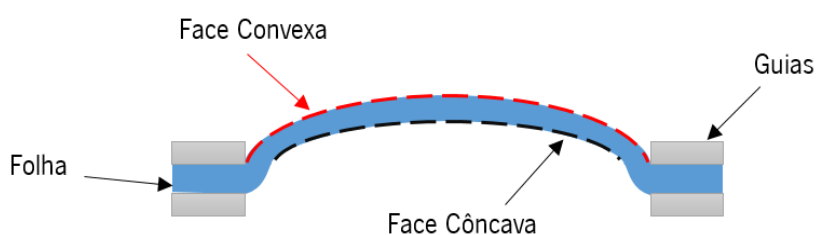
Anexo A - Resumo da comparação da mistura GPPS/HIPS vs PET efetuada na secção 3.3. O símbolo **(V)** indica qual dos dois sistemas poliméricos apresenta vantagem.

	Mistura GPPS/HIPS	PET
Extrusão	(V) Pode ser extrudida sem recorrer a secagem prévia	Necessário secar para evitar a perda de propriedades, o que representa um custo adicional
	(V) Perfil de temperaturas normal das resistências do cilindro	Perfil de temperaturas das resistências inverso
	(V) Filtros com malha mais aberta	Filtros com malha mais refinada, pelo que ficam obstruídos mais rapidamente
	(V) Utiliza calços externos na cabeça de extrusão	Requer calços internos de modo a prevenir a degradação, aumentando a complexidade do equipamento e da montagem
	(V) Não necessita de uma taxa de arrefecimento elevada, uma vez que se trata dum polímero amorfo	Deve ser arrefecido rapidamente de forma a ganhar consistência para calandrar e para prevenir a cristalização
	Necessita de uma camada de GPPS quando o objetivo é uma folha de alto brilho. Esta camada pode fragilizar a folha	(V) Possui alto brilho natural
Termoformação	(V) Não cristaliza, uma vez que é um sistema polimérico amorfo	Temperaturas utilizadas devem ser escolhidas cuidadosamente, de modo a não obter cristalização indesejada
Produto Final	(V) Fratura fácil, normalmente utilizada como referência para copos de iogurte <i>multipack</i>	Difícil separar os copos, sendo para tal necessário adicionar cargas que retirem potencial de reciclabilidade ou recorrer a cortantes específicos na termoformação
	O monómero de PS é considerado tóxico, pelo que a sua migração para o alimento deve respeitar um limite legal	(V) Não apresenta problemas de migração de substâncias
	(V) Recipientes muito utilizados em processo de <i>hot-fill</i> e nas máquinas de <i>vending</i>	Recipientes em PET não suportam temperaturas utilizadas no processo de <i>hot-fill</i> , colapsando termicamente
Reciclagem	Elevada contaminação do reciclado, dado o vasto leque de aplicações do PS	(V) Elevada quantidade de resíduos de PET relativamente limpos proveniente das garrafas
	Reciclagem praticamente inexistente, devido a barreiras económicas associadas aos processos de segregação	(V) Níveis de reciclagem elevados, comparativamente ao resto dos polímeros

Existem apenas 23 <i>grades</i> (rPS) aprovados para contacto alimentar	(V) Mais de 160 <i>grades</i> de rPET com aprovação para contacto alimentar
(V) Mantém as suas propriedades durante vários ciclos	Elevada perda de propriedades com o aumento do número de ciclos de reciclagem

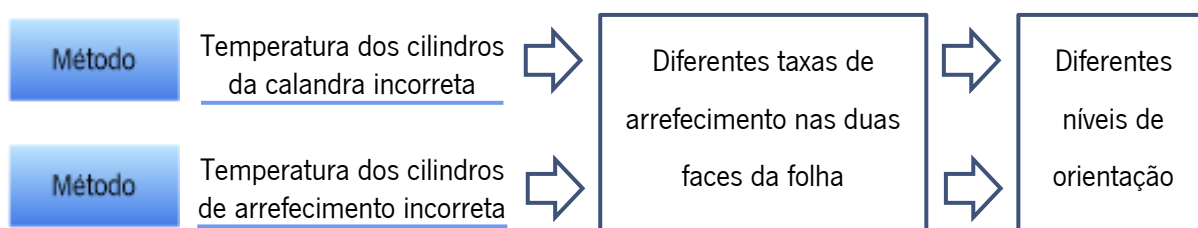
Anexo B - Manual de Apoio à Produção.

EMPENO



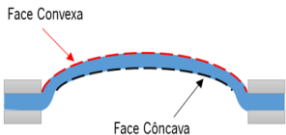
Distorção de uma folha conforme devido à presença de diferentes níveis de orientação molecular.

• CAUSAS



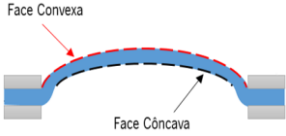
NOTA: Ambas as causas têm o mesmo efeito no arrefecimento da folha, porém a temperatura dos cilindros de arrefecimento tem um impacto menor.

• AÇÕES CORRETIVAS



1. Ajustar a temperatura do cilindro três, consoante o caso em análise.

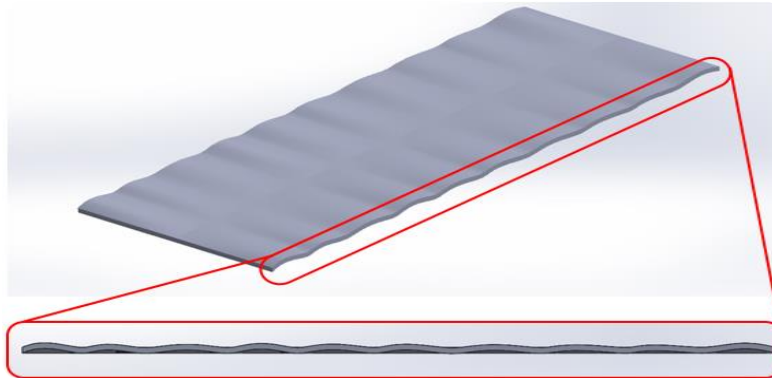
- No caso do cilindro três contactar com a face convexa, deve-se proceder a um aumento da temperatura, sendo que caso este contacte com a face côncava deve-se reduzir a sua temperatura.



2. Ajustar o fluxo da água dos cilindros de arrefecimento.

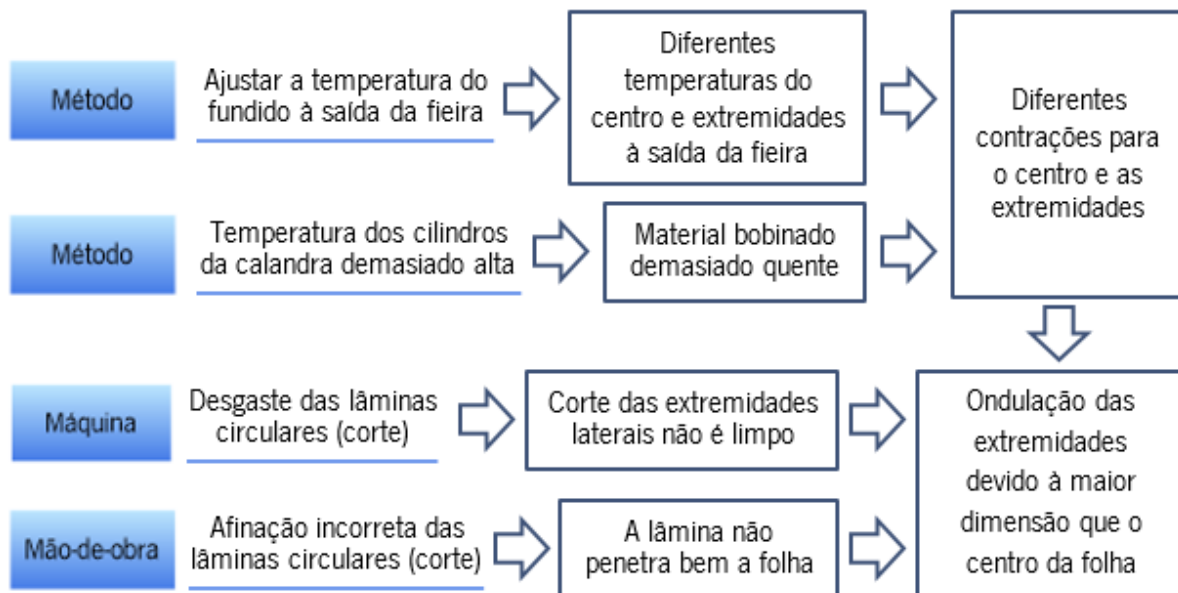
- Esta medida apenas deve ser tomada como último recurso, uma vez que este fluxo teria que ser controlado manualmente, o que dificulta a obtenção de um processo constante.

ONDULAÇÕES



A ondulação é uma não conformidade que se manifesta nas extremidades da folha, como forma de compensar a maior dimensão longitudinal desta zona comparativamente ao centro da bobine.

• CAUSAS



• AÇÕES CORRETIVAS

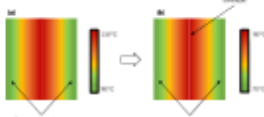


1. Verificar o processo de corte das tiras laterais

- Deve-se investigar o estado das lâminas de corte, bem como a sua afinação.

2. Verificar a temperatura do fundido à saída da fiação

- Esta verificação pode ser efetuada com recurso a uma câmara termográfica.



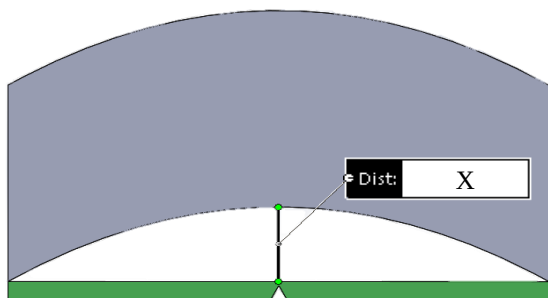
3. Reduzir as temperaturas da calandra

- Objetivo: promover uma maior transferência de calor, prevenindo o arrefecimento livre da folha e o aparecimento de ondulação.

(Em último caso)

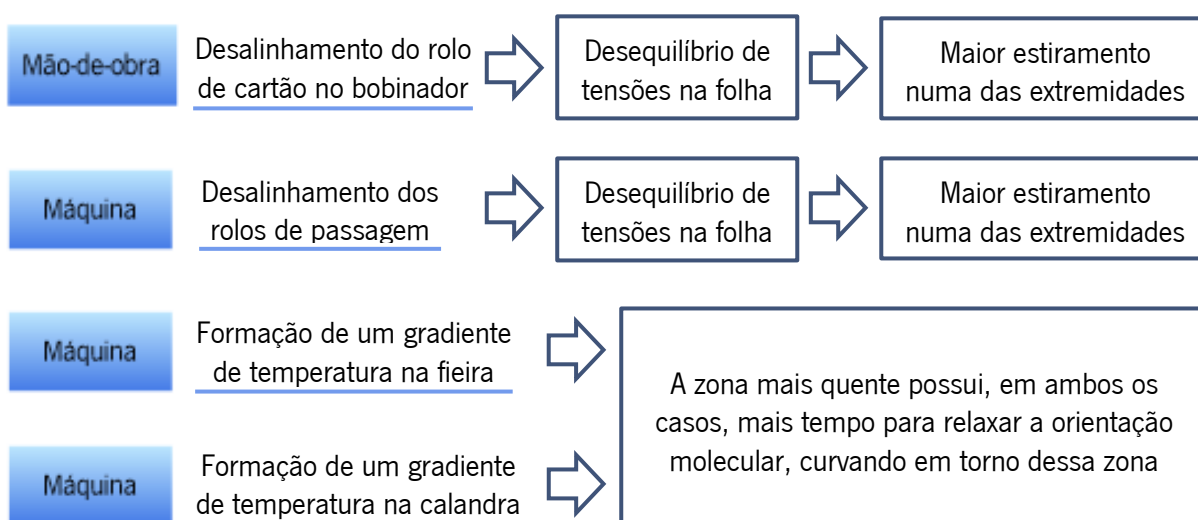
4. Reduzir velocidade linear da linha

FLECHA



Curvatura da folha para um dos seus lados, como consequência de um gradiente transversal de contração e/ou orientação molecular, tendo origem em desequilíbrios transversais ao longo do processamento.

• CAUSAS



• AÇÕES CORRETIVAS



1. Verificar o alinhamento da folha com os restantes componentes.

- Operação mais expostas a erros devido ao número de vezes que esta operação é efetuada ao longo de uma produção.



2. Verificar o alinhamento dos rolos de passagem.

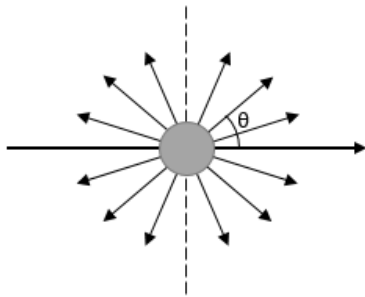
- Esta verificação pode ser efetuada com recurso a instrumentos de medição.

3. Verificar a temperatura da folha à saída da fieira

- Pode ser efetuada com recurso a uma câmara termográfica.

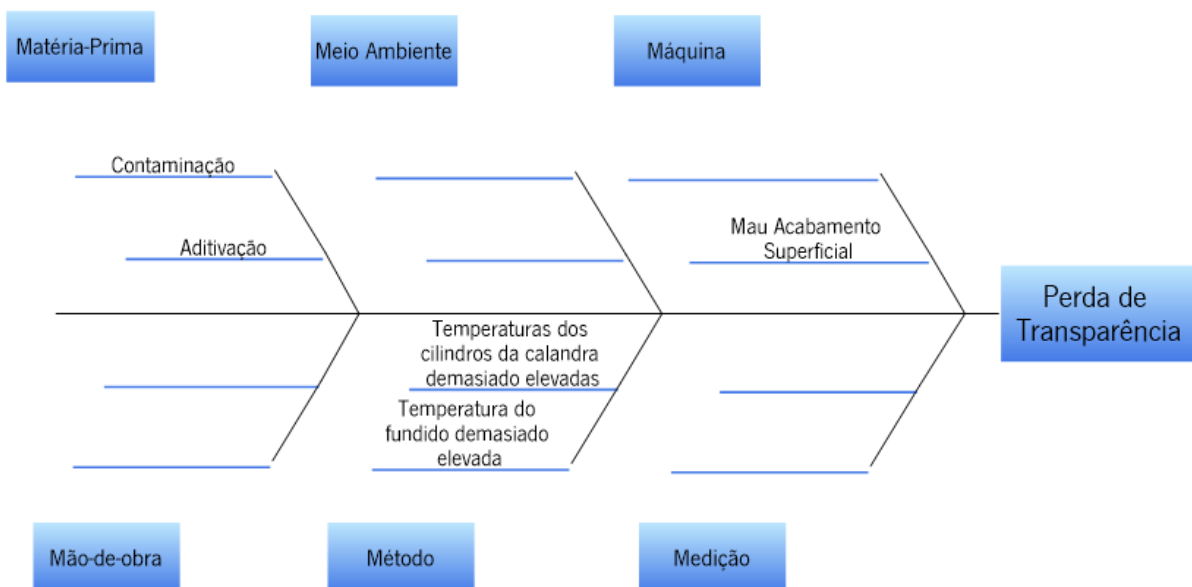
4. Verificar a temperatura de entrada e saída de água da calandra

PERDA DE TRANSPARÊNCIA



Difusão da luz ao longo da amostra, bem como à superfície, devido a diferenças de índice de refração, causando perda de transparência. A difusão ocorre quando existe uma distribuição do feixe de luz principal num conjunto de novos feixes, cada um com a sua direção de propagação.

• CAUSAS



• AÇÕES CORRETIVAS

1. Reduzir a temperatura dos cilindros da calandra.

- Esta ação promove a transferência de calor entre os cilindros da calandra e a folha.

2. Reduzir a temperatura do fundido.

- Pode ser efetuada nas temperaturas da fieira, bloco distribuidor e/ou da extrusora.

3. Verificar a condição dos cilindros da calandra.

- Cilindros com um acabamento inadequado devem ser recondicionados ou substituídos.

4. Verificar a composição da folha.

5. Alterar a composição da folha, adicionando agente nucleante.

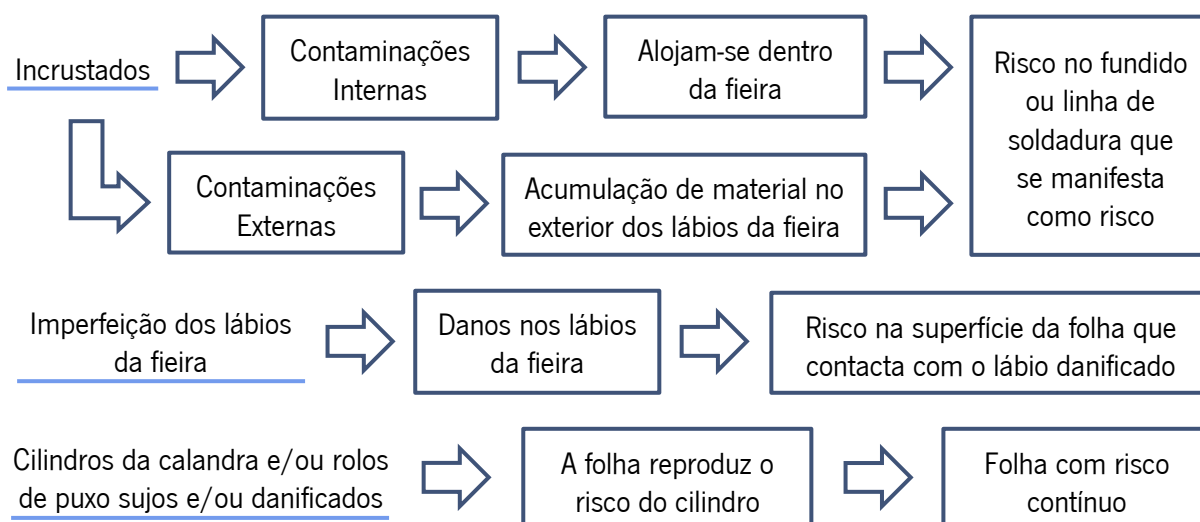
RISCO CONTÍNUO NA DIREÇÃO DE EXTRUSÃO



Tem origem num componente da linha de extrusão danificado que pode estar associado ao processo de extrusão, bem como a um dos processos auxiliares. Quando o risco advém da extrusão, este é visível no fundido à saída da fieira. Caso contrário a origem do problema

encontra-se no equipamento auxiliar ou devido a um fator externo à produção.

• CAUSAS



• AÇÕES CORRETIVAS

1. Verificar a existência de acumulação de material nos lábios da fieira.

- Os lábios da fieira devem ser limpos com recurso a uma ferramenta com dureza inferior à do material que constitui a fieira, como por exemplo, latão ou bronze.

2. Aumentar a abertura da fieira para permitir a saída do infundido.

- Ter cuidado com os cilindros da calandra, uma vez que o infundido pode danificar a sua superfície.

3. Verificar a existência de danos nos lábios da fieira.

4. Limpeza da fieira

Anexo C - Valores apresentados pelo sistema de bobinagem no início de bobine.

Bobinador 3B			Bobinador 3B		
Pré-selecção DESLIG/LIG	Valores introd.	Val. actuais	Pré-selecção DESLIG/LIG	Valores introd.	Val. actuais
Comprimento (m)	913	0	Comprimento (m)	913	1
Diâmetro (mm)	990	225	Diâmetro (mm)	990	225
Diâm.Mandril(mm)	225	Mudança de rolo	Diâm.Mandril(mm)	225	Mudança de rolo
Largura (mm)	398		Largura (mm)	398	
Torque (%)		6	Torque (%)		7
	+/- Tens (%)			+/- Tens (%)	
Ctrl.de tensão DESLIG/LIG	10		Ctrl.de tensão DESLIG/LIG	10	
Tens. Calc. (N)		267	Tens. Calc. (N)		267
Tens. Med. (N)		515	Tens. Med. (N)		553
Velocidade(1/min)		311	Velocidade(1/min)		1040
Velocidade (%)		9	Velocidade (%)		30

Bobinador 3B			Bobinador 3B		
Pré-selecção DESLIG/LIG	Valores introd.	Val. actuais	Pré-selecção DESLIG/LIG	Valores introd.	Val. actuais
Comprimento (m)	913	2	Comprimento (m)	913	3
Diâmetro (mm)	990	225	Diâmetro (mm)	990	225
Diâm.Mandril(mm)	225	Mudança de rolo	Diâm.Mandril(mm)	225	Mudança de rolo
Largura (mm)	398		Largura (mm)	398	
Torque (%)		11	Torque (%)		13
	+/- Tens (%)			+/- Tens (%)	
Ctrl.de tensão DESLIG/LIG	10		Ctrl.de tensão DESLIG/LIG	10	
Tens. Calc. (N)		267	Tens. Calc. (N)		267
Tens. Med. (N)		816	Tens. Med. (N)		414
Velocidade(1/min)		515	Velocidade(1/min)		1135
Velocidade (%)		15	Velocidade (%)		33

Bobinador 3B		
Pré-selecção DESLIG/LIG	Valores introd.	Val. actuais
Comprimento (m)	913	4
Diâmetro (mm)	990	225
Diâm.Mandril(mm)	225	Mudança de rolo
Largura (mm)	398	Mudança de rolo
Torque (%)		12
	+/- Tens (%)	
Ctrl.de tensão DESLIG/LIG	10	
Tens. Calc. (N)		267
Tens. Med. (N)		232
Velocidade(1/min)		1297
Velocidade (%)		38

Bobinador 3B		
Pré-selecção DESLIG/LIG	Valores introd.	Val. actuais
Comprimento (m)	913	5
Diâmetro (mm)	990	229
Diâm.Mandril(mm)	225	Mudança de rolo
Largura (mm)	398	Mudança de rolo
Torque (%)		14
	+/- Tens (%)	
Ctrl.de tensão DESLIG/LIG	10	
Tens. Calc. (N)		267
Tens. Med. (N)		482
Velocidade(1/min)		1703
Velocidade (%)		49

Bobinador 3B		
Pré-selecção DESLIG/LIG	Valores introd.	Val. actuais
Comprimento (m)	913	6
Diâmetro (mm)	990	229
Diâm.Mandril(mm)	225	Mudança de rolo
Largura (mm)	398	Mudança de rolo
Torque (%)		12
	+/- Tens (%)	
Ctrl.de tensão DESLIG/LIG	10	
Tens. Calc. (N)		267
Tens. Med. (N)		202
Velocidade(1/min)		1722
Velocidade (%)		50

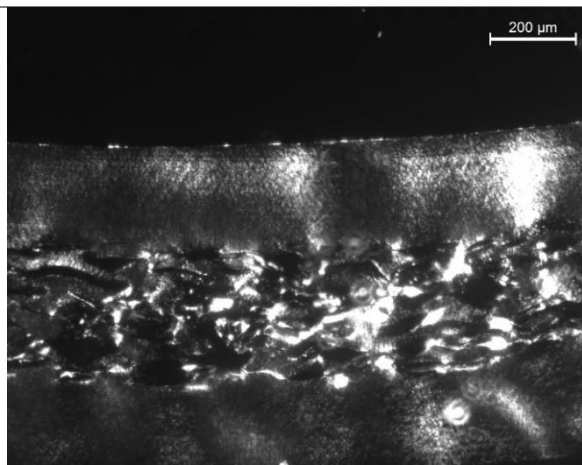
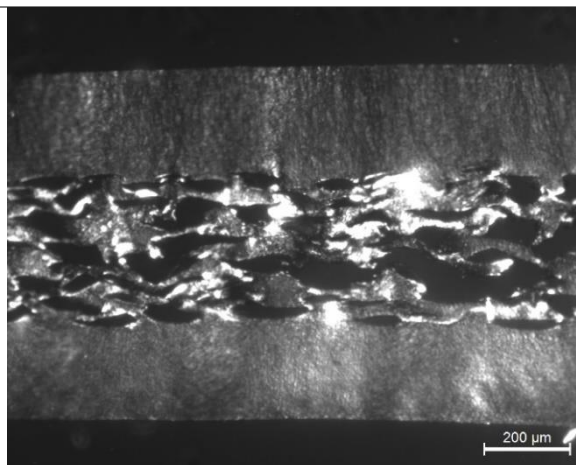
Bobinador 3B		
Pré-selecção DESLIG/LIG	Valores introd.	Val. actuais
Comprimento (m)	913	7
Diâmetro (mm)	990	234
Diâm.Mandril(mm)	225	Mudança de rolo
Largura (mm)	398	Mudança de rolo
Torque (%)		10
	+/- Tens (%)	
Ctrl.de tensão DESLIG/LIG	10	
Tens. Calc. (N)		267
Tens. Med. (N)		173
Velocidade(1/min)		1736
Velocidade (%)		50

Anexo D - Figuras obtidas através do microscópio Olympus BH-2 relativas à não conformidade “Ondulação”.

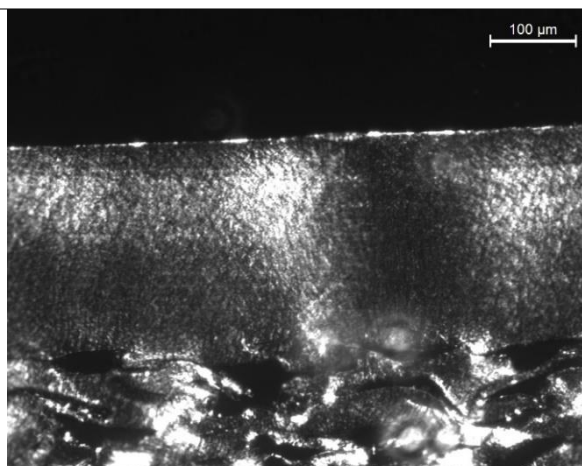
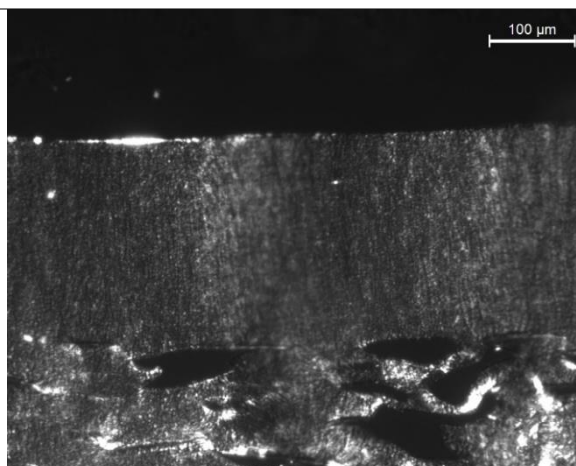
Centro

Extremidade

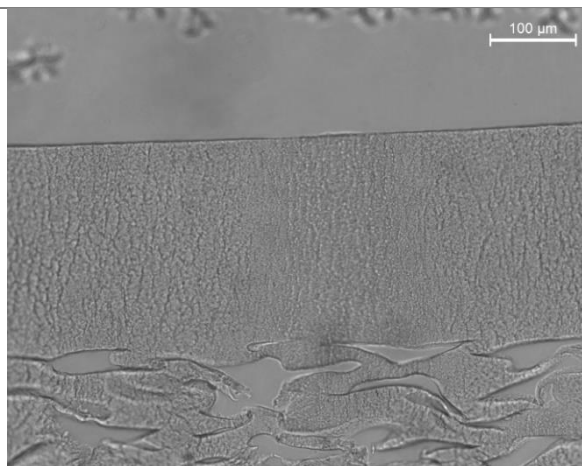
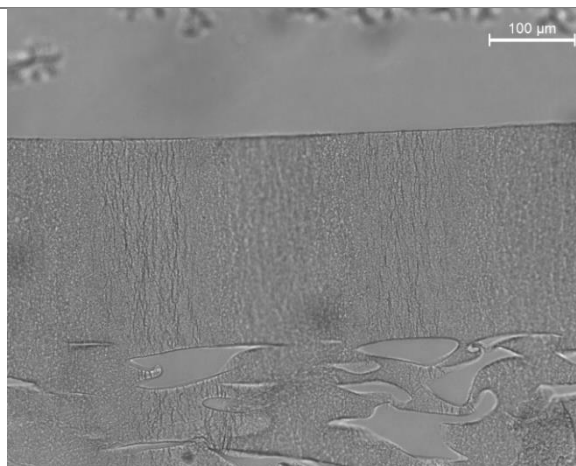
Microscopia de Luz Polarizada (Ampliação 10 x 1.67)



Microscopia de Luz Polarizada (Ampliação 20 x 1.67)



Microscopia de Campo Claro (Ampliação 20 x 1.67)



Anexo E - Valores obtidos no teste da contração para a amostra de controlo relativa à ondulação. É de notar que os valores dentro de especificação para a contração longitudinal (L.) são entre 7% e 14% e para a contração transversal (T.) entre 4% e 7%. Assinalados a vermelhos são aqueles valores que se encontram fora de especificação.

Amostra	L ₀ (mm)	Extremidade 1		Centro		Extremidade 2	
		L. (%)	T. (%)	L. (%)	T. (%)	L. (%)	T. (%)
1	100,00	13,48%	4,81%	13,88%	3,96%	14,31%	3,82%
2	100,00	13,83%	1,82%	12,60%	3,60%	10,93%	1,89%
3	100,00	12,05%	3,86%	13,98%	4,00%	13,48%	7,88%
4	100,00	13,70%	3,59%	13,49%	5,83%	14,05%	4,96%
5	100,00	13,85%	4,29%	12,42%	6,19%	13,58%	4,73%
Média	—	13,38% ± 0,68%	3,67% ± 1,01%	13,27% ± 0,65%	4,72% ± 1,07%	13,27% ± 1,21%	4,66% ± 1,94%

Anexo F - Valores obtidos no teste da contração para a amostra com ondulação. É de notar que os valores dentro de especificação para a contração longitudinal (L.) são entre 7% e 14% e para a contração transversal (T.) entre 4% e 7%. Assinalados a vermelhos são aqueles valores que se encontram fora de especificação.

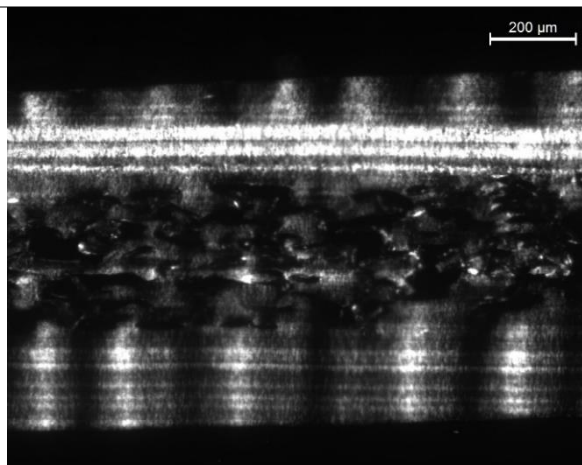
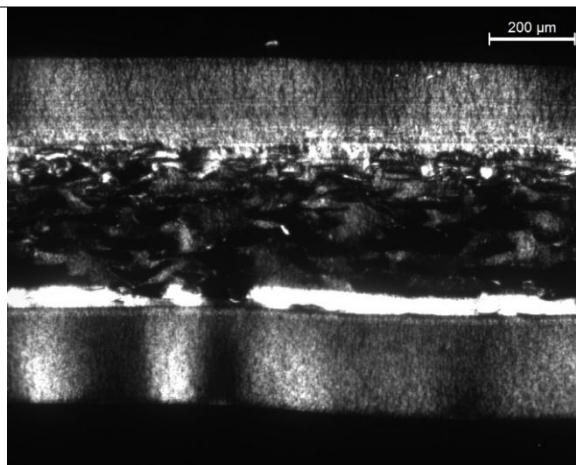
Amostra	L ₀ (mm)	Extremidade 1		Centro		Extremidade 2	
		L. (%)	T. (%)	L. (%)	T. (%)	L. (%)	T. (%)
1	100,00	13,90%	3,40%	14,80%	3,62%	14,83%	4,65%
2	100,00	14,20%	3,10%	14,50%	4,01%	13,90%	3,93%
3	100,00	14,76%	4,39%	14,00%	3,71%	14,08%	5,20%
4	100,00	13,50%	4,96%	12,90%	4,77%	13,69%	4,39%
5	100,00	14,66%	4,60%	13,72%	5,68%	13,82%	3,90%
Média	—	14,20% ± 0,47%	4,09% ± 0,72%	13,98% ± 0,66%	4,36% ± 0,77%	14,06% ± 0,40%	4,41% ± 0,48%

Anexo G - Figuras obtidas através do microscópio Olympus BH-2 relativas à não conformidade “Flecha”.

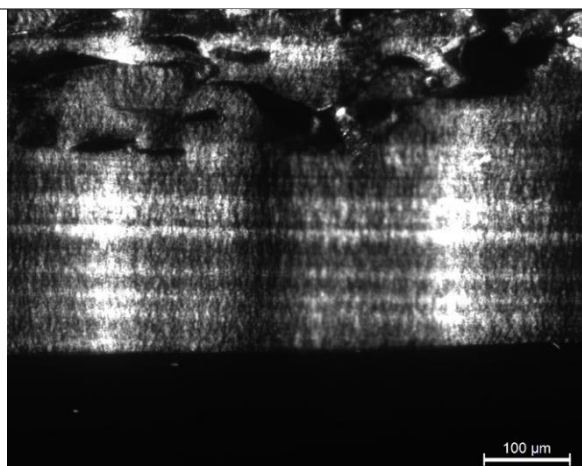
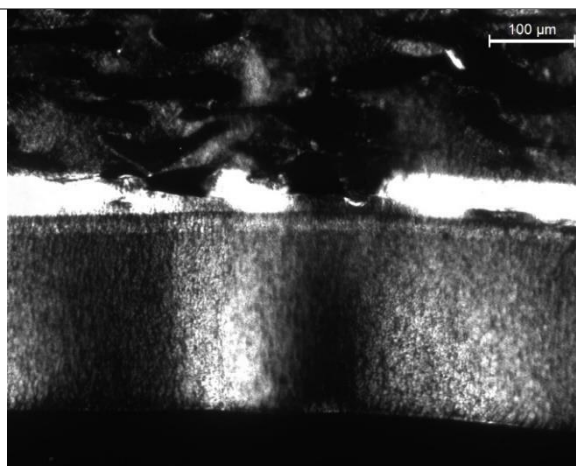
Extremidade Estirada

Extremidade Contraída

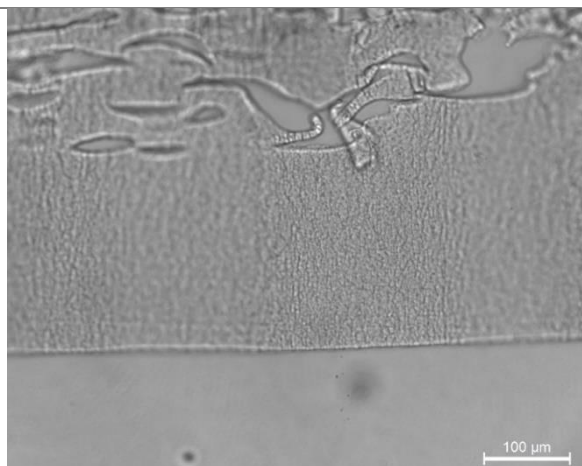
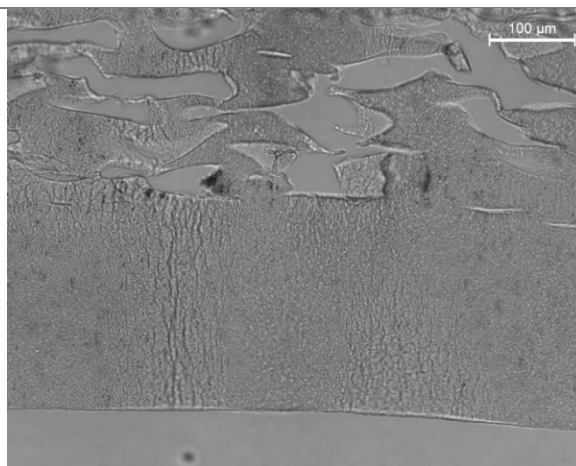
Microscopia de Luz Polarizada (Ampliação 10 x 1.67)



Microscopia de Luz Polarizada (Ampliação 20 x 1.67)



Microscopia de Campo Claro (Ampliação 20 x 1.67)



Anexo H - Valores obtidos no teste da contração para a amostra de controlo relativa à flecha. É de notar que os valores dentro de especificação para a contração longitudinal são entre 7% e 14% e para a contração transversal entre 4% e 7%. Assinalados a vermelhos são aqueles valores que se encontram fora de especificação.

Amostra	L ₀ (mm)	Extremidade Estirada		Extremidade Contraída	
		Longitudinal (%)	Transversal (%)	Longitudinal (%)	Transversal (%)
1	100,00	14,52	4,65	13,90	3,40
2	100,00	13,90	3,93	14,20	3,10
3	100,00	14,08	5,20	13,76	4,39
4	100,00	13,69	4,39	13,50	4,96
5	100,00	13,82	3,90	14,24	4,60
Média	—	14,00 ± 0,29	4,41 ± 0,48	13,92 ± 0,28	4,09 ± 0,72

Anexo I - Valores obtidos no teste da contração para a amostra com flecha. É de notar que os valores dentro de especificação para a contração longitudinal são entre 7% e 14% e para a contração transversal entre 4% e 7%. Assinalados a vermelhos são aqueles valores que se encontram fora de especificação.

Amostra	L ₀ (mm)	Extremidade Estirada		Extremidade Contraída	
		Longitudinal (%)	Transversal (%)	Longitudinal (%)	Transversal (%)
1	100,00	15,80	3,40	13,81	4,01
2	100,00	15,60	2,40	14,03	4,14
3	100,00	16,20	3,00	13,00	5,10
4	100,00	13,90	2,50	13,81	3,63
5	100,00	14,20	3,10	14,34	5,34
Média	—	15,14 ± 0,92	2,88 ± 0,38	13,80 ± 0,44	4,44 ± 0,66

Anexo J - Condições de processamento comuns a todas as amostras de PET utilizadas na validação experimental da não conformidade “Perda de Transparência”.

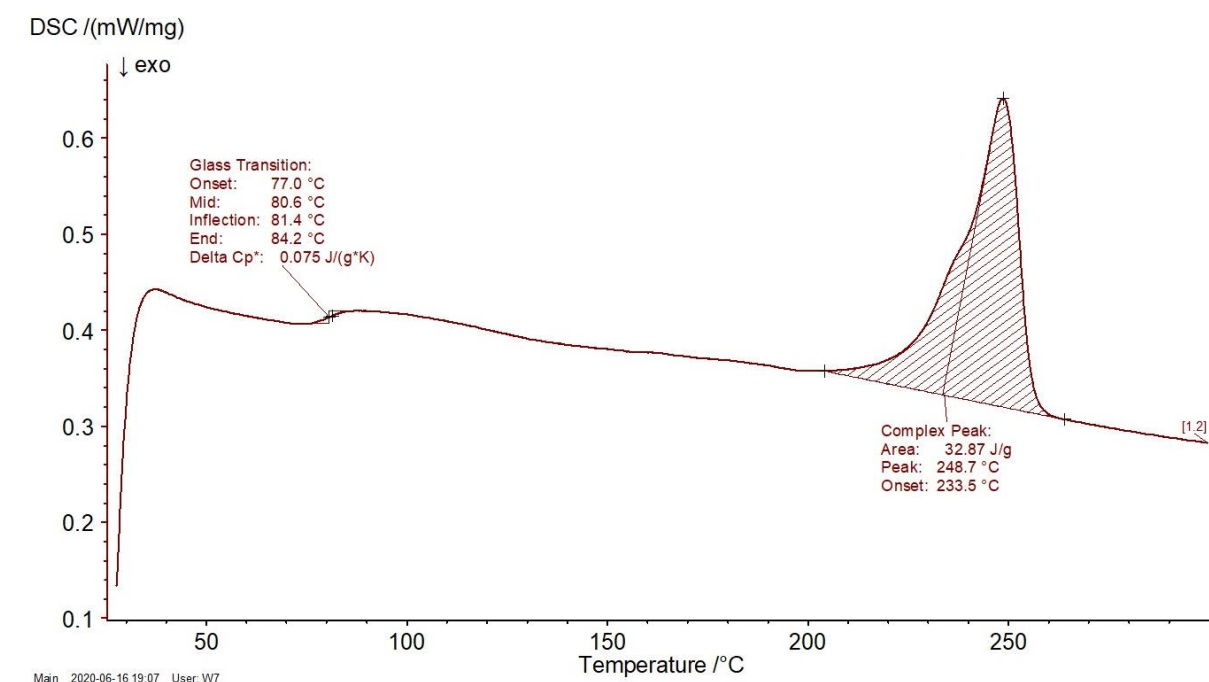
Perfil de Temperatura da Extrusora 1	280°C / 280°C / 280°C / 280°C
Velocidade da Extrusora 1	170 rpm
Perfil de Temperatura da Extrusora 2	280°C / 280°C / 280°C / 280°C
Velocidade da Extrusora 2	170 rpm
Temperatura dos Blocos	250°C
Temperatura da Fieira	260°C
Velocidade dos Cilindros de Arrefecimento	2.30 m/min
Velocidade dos Rolos de Puxo	2.43 m/min

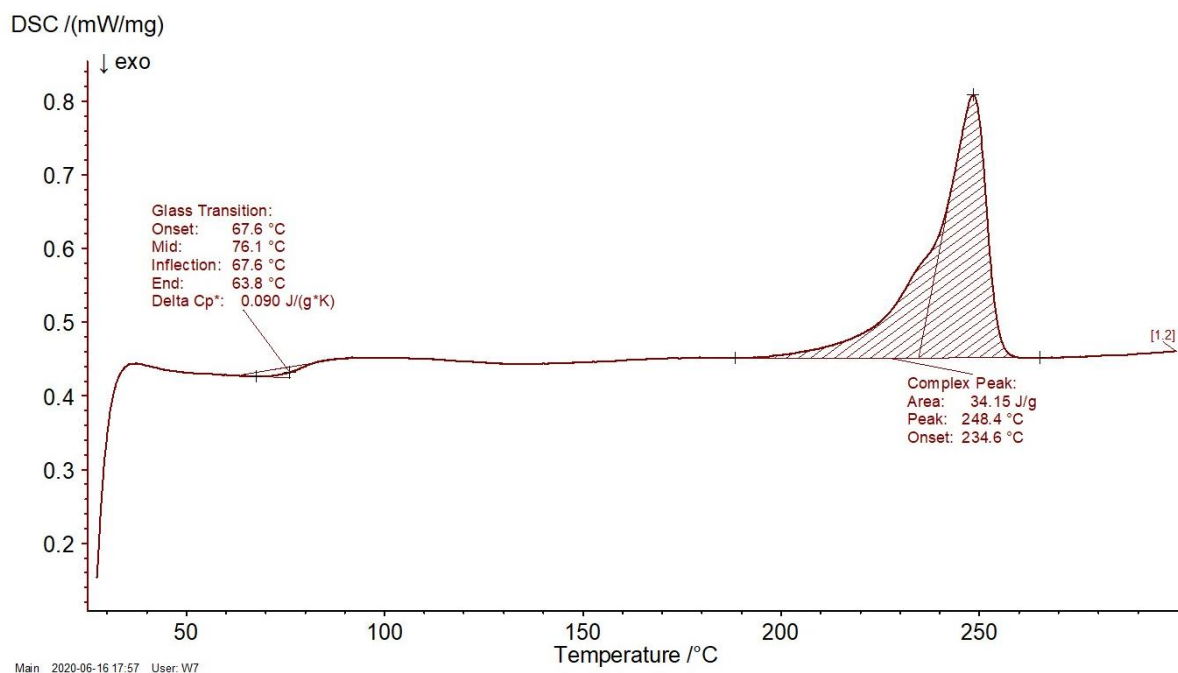
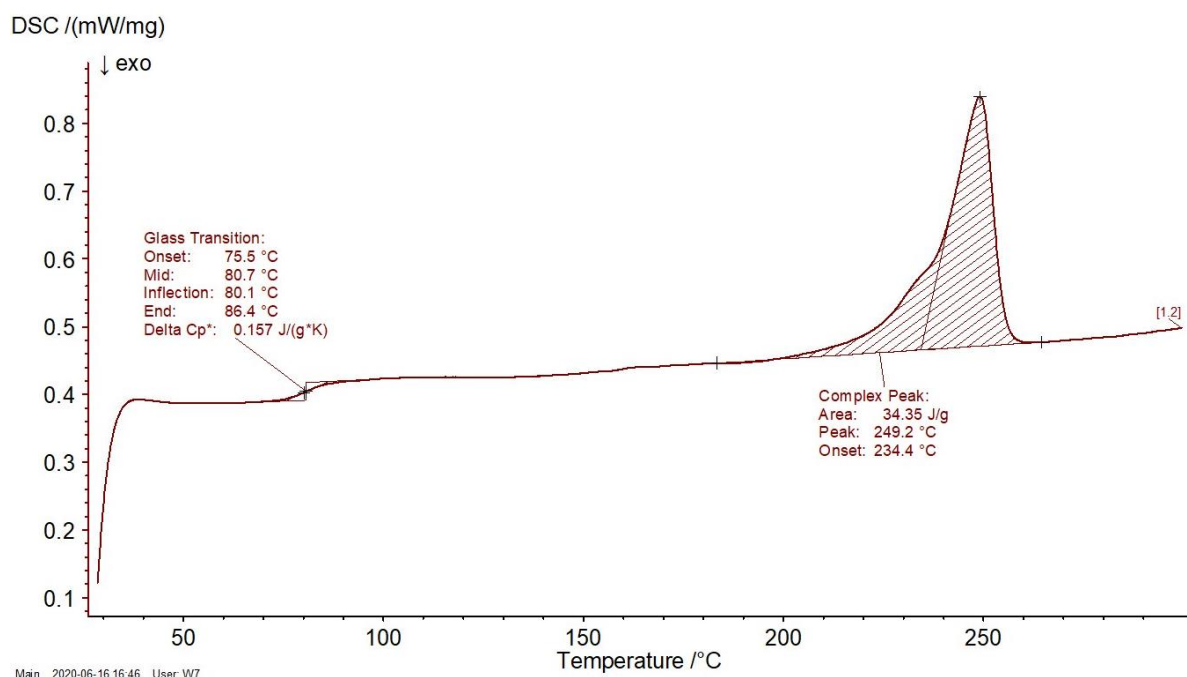
Anexo K - Valores da transmitância luminosa das amostras referentes à validação experimental da não conformidade “Perda de Transparência”.

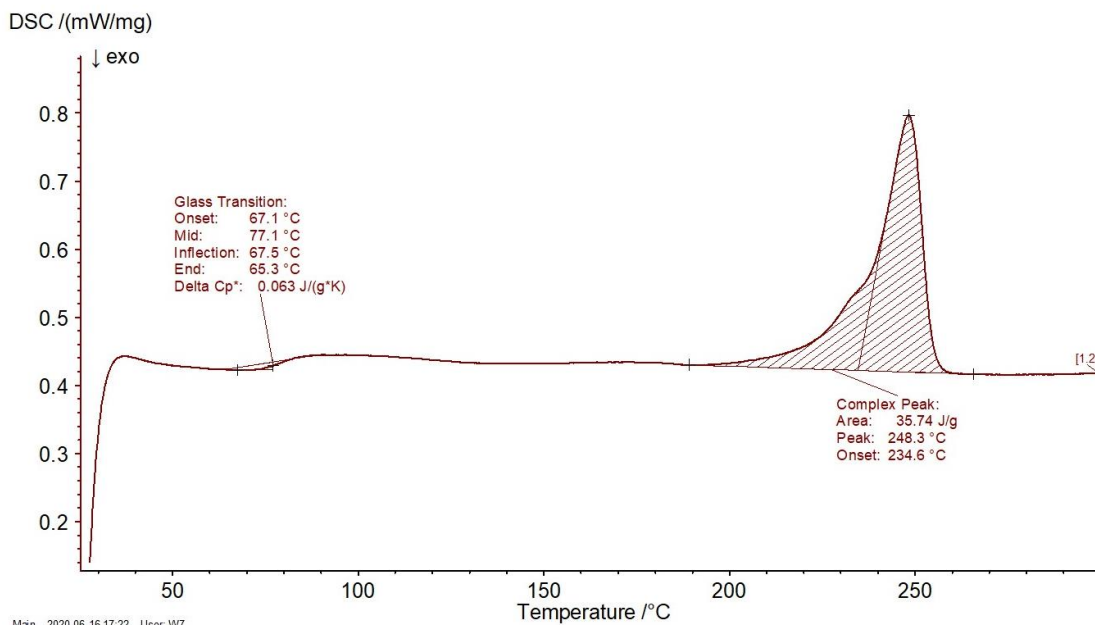
Temperaturas (%)	20/28/38	30/38/48	40/48/58	60/68/78
Transmitância (%)	0,34	1,13	1,01	1,02
	1,01	0,57	0,56	0,56
	0,56	0,56	0,54	0,56
	0,67	0,45	0,34	0,45
	0,67	0,56	1,02	1,13
Total (%)	0,65 ± 0,22	0,65 ± 0,24	0,68 ± 0,29	0,74 ± 0,27

Anexo L - Curva fluxo das amostras utilizadas para validação experimental da não conformidade “Perda de Transparência”.

Amostra 20/28/38



Amostra 30/38/48**Amostra 40/48/58**

Amostra 60/68/78

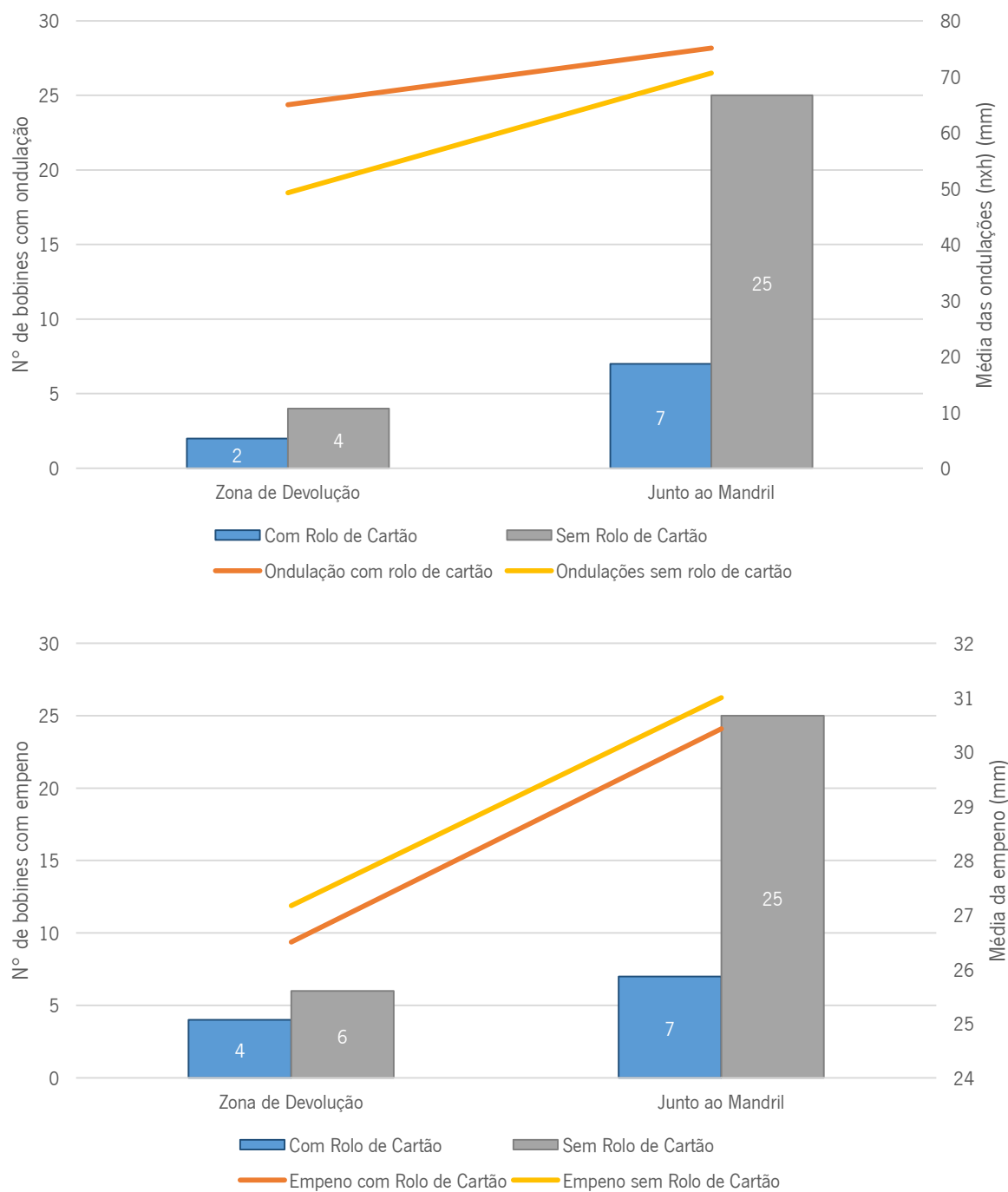
Anexo M - Valores da transmitância luminosa das amostras com várias percentagens de antiblock utilizadas na validação experimental da não conformidade “Perda de Transparência”.

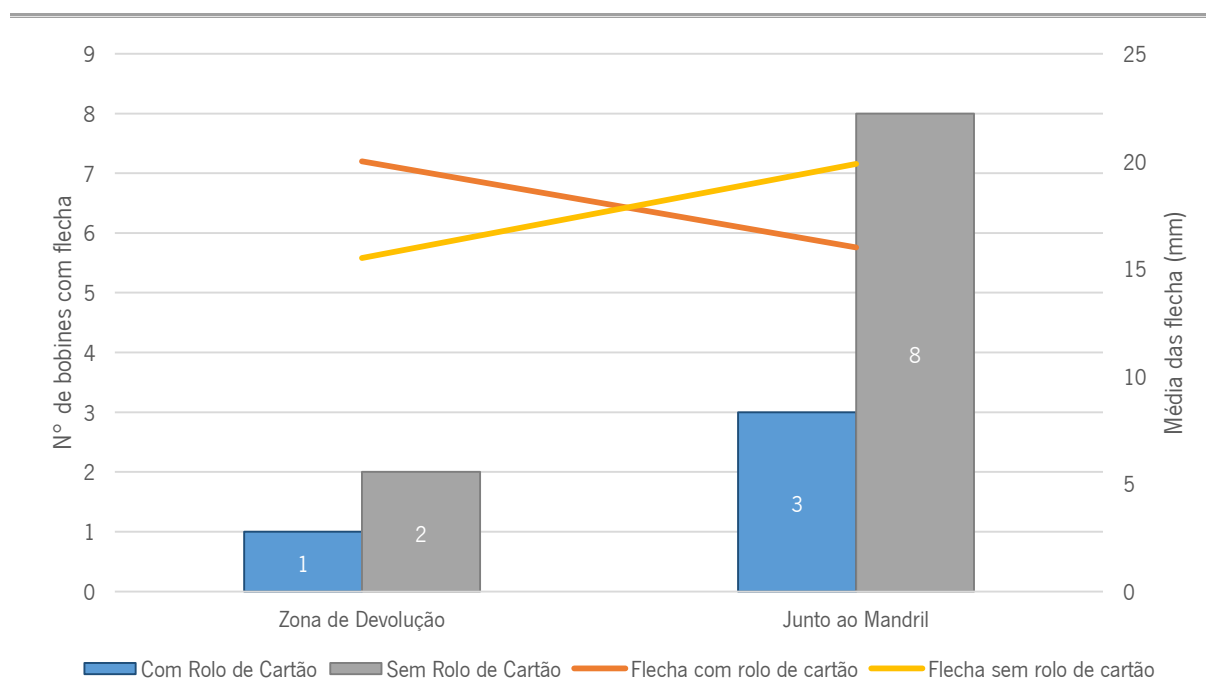
Incorporação de Antiblock (%)	0,50%	2,00%	4,00%
Transmitância (%)	2,43	4,99	12,66
	1,88	4,08	14,45
	1,99	3,95	15,16
	2,55	5,19	14,39
	3,10	4,47	15,13
Total (%)	2,39 ± 0,44	4,63 ± 0,51	14,36 ± 0,91

Anexo N - Medição da ondulação, empeno e flecha, respetivamente, das bobines referentes ao caso de estudo 1.



Anexo 0 - Comparação da ondulação, empeno e flecha, respetivamente, consoante a zona e a presença do rolo de cartão relativamente ao caso de estudo 2.





Anexo P - Valores da transmitância luminosa das amostras referentes ao caso de estudo

3.

Temperaturas (°C)	Sem Aquecimento	50	75	85	95	100
Transmitância (%)	4,03	4,84	4,95	5,13	5,28	6,15
	4,70	4,95	5,06	5,40	5,38	5,14
	4,26	5,06	4,95	5,18	5,27	6,58
	5,27	5,06	4,95	5,06	5,61	6,40
	5,06	4,94	5,01	5,28	5,95	5,49
Total (%)	4,66 ± 0,47	4,97 ± 0,08	4,98 ± 0,04	5,05 ± 0,09	5,50 ± 0,26	5,95 ± 0,55

Anexo Q - Valores da transmitância luminosa das novas formulações testadas no caso de estudo 3 com aquecimento a 75°C.

Incorporação de Antiblock (%)	0,50%	2,00%	4,00%
Transmitância (%)	2,76	4,95	14,38
	2,99	5,06	14,40
	2,32	4,95	15,07
	3,10	4,95	16,61
	3,32	5,01	14,74
Total (%)	2,90 ± 0,34	4,98 ± 0,04	14,64 ± 0,25