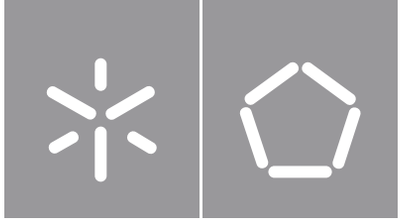
Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Mafalda Alexandra Gonçalves de Freitas Costa

Estudo da estabilidade dimensional na co-extrusão de pisos para pneus

Janeiro de 2020



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Mafalda Alexandra Gonçalves de Freitas Costa

Estudo da estabilidade dimensional na co-extrusão de pisos para pneus

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do
João Miguel de Amorim Novais da Costa Nóbrega
Jorge Manuel Ferreira Veloso

Janeiro de 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

Desde o início deste projeto, contei com a confiança e o apoio de pessoas e instituições. Sem os quais este projeto não teria sido possível.

Primeiramente gostaria de agradecer ao professor Miguel Nóbrega, pelo constante apoio, confiança, disponibilidade e excelente orientação prestada ao longo das várias etapas desta dissertação.

Ao Eng. Bruno Fernandes pela oportunidade de realizar a minha dissertação de mestrado nesta prestigiada empresa e pela preocupação que constantemente demostrou.

Ao Sr. Jorge Veloso por todo o conhecimento que me legou, pela paciência e dedicação. Obrigada sobretudo pelos momentos de descontração que me proporcionou, pela amizade e pelo carinho.

Gostaria também de agradecer ao Eng. Rui Santos, à Eng. Carla Maciel, à Eng. Mariana Carvalho e ao Rui Costa por se mostrarem sempre prestáveis e por abdicarem inúmeras vezes dos seus afazeres para me auxiliar.

Um agradecimento muito especial aos meus colegas da oficina de fieiras, pela equipa incrível que formam e por me terem feito sentir sempre "em casa". Obrigada, sem exceções, a todos pelo carinho, pela boa disposição, pela simplicidade e sobretudo por fazerem de mim um "homem".

Aos operadores da extrusora E04, com os quais tive o prazer de trabalhar, obrigada pela disponibilidade e boa disposição.

Aos meus amigos, especialmente à Carina, Catarina e Cíntia, pelos cinco anos repletos de momentos incríveis. Obrigada por serem os meus momentos bons e principalmente por estarem sempre disponíveis para os momentos menos bons. Sem vocês, teria sido certamente muito mais difícil. Um cuidado agradecimento ao Afonso, ao João e à Rafaela pela incansável amizade. Aos restantes, obrigada pela boa energia e folia.

Acima de tudo, um enorme obrigada à minha família. Aos meus pais por todo o amor, por toda a paciência e sobretudo por todos os esforços que sempre fizeram para me proporcionar o melhor. À minha irmã, por acreditar nas minhas capacidades e no meu sucesso, muitas vezes ainda mais que eu própria.

Um agradecimento sincero 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.

Resumo

A indústria de pneus apresenta uma vigorosa competitividade no crescimento e no desenvolvimento de novas estratégias para a melhoria do produto e otimização do processo produtivo. O processo de co-extrusão é utilizado na Continental Mabor para a produção do elemento mais externo do pneu- o piso. As linhas de co-extrusão da Continental Mabor são dotadas de um sistema de controlo das variáveis: massa linear e largura inicial, dos respetivos pisos. Quando existem não-conformidades face aos requisitos o sistema segrega esses pisos, internamente denomina-se os pisos não-conformes de *workoff*. No último ano, o desperdício médio gerado na co-extrusão de pisos – *taxa de workoff*- foi cerca de 12% o que se traduz num grande gasto de tempo, dinheiro e numa sobrecarga de produção.

Partindo desta contextualização, esta dissertação proposta pela Continental Mabor- Indústria de Pneus, visava estudar as variáveis do processo que têm influência na instabilidade dimensional dos artigos extrudidos, em concreto na dimensão da largura inicial, por forma a determinar novas estratégias de otimização do processo de co-extrusão que permitam diminuir significativamente a taxa de workoff.

Na primeira fase de desenvolvimento deste projeto recorreu-se à caraterização reológica da matéria-prima para aferir a sensibilidade da reologia dos materiais às variáveis do processo de co-extrusão. Estudou-se a variável "temperatura do perfil extrudido à saída da fieira" o que permitiu verificar que existia uma correlação entre a uniformidade da variável largura inicial e a temperatura do perfil. E realizou-se um diagnóstico do sistema de controlo inteligente do processo de co-extrusão (RMEA) que permitiu identificar a existência de lacunas nesse sistema de controlo. O que deu origem à segunda fase de desenvolvimento. Assim, surgiu uma proposta de novo modelo de controlo inteligente (EPIC) com novos parâmetros e com uma flexibilidade de controlo que irá permitir reduzir significativamente a taxa de workoff gerada.

Palavras-chave: pisos, co-extrusão, largura inicial, estabilidade dimensional, temperatura, RMEA, EPIC.

Characterization of shape memory properties of a polyurethane: Influence of critical parameters

Abstract

The tire industry is vigorously competitive in the growth and development of new strategies for product improvement and production process optimization. The co-extrusion process is used at Continental Mabor to produce the outer element of the tire, commonly called tread. The co-extrusion lines at Continental Mabor are equipped with a control system for the weight, width and length dimensions. When non-compliances with the requirements occur, the system segregates these treads. Internally the non-compliant treads are called workoff. In the last year, the average waste created by the tread extrusion –workoff rate- was roughly 12% which translates in a big waste of time, money and a production overload. The start and stabilization phase of the extrusion –setup- is the stage that contributes the most for the workoff rate.

Starting from this contextualization, this dissertation proposed by Continental Mabor- Industria de Pneus, aims to study the process variables that influence the dimensional stability of the extruded items, in particular the width dimension on the setup phase, to determine new optimization strategies of the co-extrusion process, that would allow to significantly reduce the workoff rate.

In the first phase of development of this project, data was collected to proceed to the rheological characterization, even if preliminary, of the rubber, handled in the co-extrusion process to understand its behaviour and flow at the extrusion head. Tread production was monitored, and extrusion tests were made, to measure the temperature profile of the extruded profile right after its exit from the extrusion die, with the means to determine standard behaviour and/or disruptions in the extrusion temperature control. In the second phase, work was focused on understanding the behaviour of the current extrusion control system. With this, it was found that there were shortcomings in the current control system and during this dissertation, extrusion tests were made so that it was possible to plan a new control model with new parameters and control flexibility that will allow to significantly reduce the workoff rate generated.

Keywords: tire tread, coextrusion, initial width, dimensional stability, temperature, RMEA, EPIC.

ÍNDICE

Agradecimentos ..... **ii**

Resumo ..... **iv**

Abstract ..... **v**

Lista de abreviaturas e siglas ..... **ix**

Índice de figuras ..... **xi**

Índice de tabelas ..... **xiii**

Capítulo 1 - Introdução Geral **1**

1.1 Apresentação da Empresa 1

1.2 Contextualização teórica 3

1.2.1 Estrutura do Pneu 3

1.2.2 Piso 4

1.2.3 Formulação de Compostos de Borracha 5

1.2.4 Processo Produtivo 6

1.2.5 Co-extrusão de Pisos 8

1.2.6 Fieiras 12

1.2.7 Processamento inteligente 13

1.3 Motivação 15

1.4 Objetivos 16

1.5 Organização da Dissertação 16

Capítulo 2 – Estado da arte **18**

2.1. Estabilidade dimensional de perfis extrudidos 18

2.1.1. Projeto de Fieiras 18

2.1.2. Controlo do processo de extrusão 21

Transporte nas passadeiras 21

Temperatura 22

Capítulo 3 - Materiais e Métodos 25

3.1. Identificação e seleção de variáveis 25

3.2. Materiais 26

Materiais: Teste A e C 27

Materiais: Teste B 27

3.3. Métodos 28

3.3.1. Teste A 28

3.3.2. Teste B 37

3.3.3. Teste C 43

Capítulo 4 – Análise e discussão de resultados 46

4.1. Análise e discussão dos resultados obtidos: Teste A 46

- Conclusões parciais: Teste A 49

4.2. Análise e discussão dos resultados obtidos: Teste B 50

- Conclusões parciais: Teste B 51

4.3. Análise e discussão dos resultados obtidos: Teste C 52

- Conclusões parciais: Teste C 54

4.4. Apreciação global dos resultados 54

Capítulo 5 - Desenvolvimento de novo conceito de controlo: EPIC 55

Planeamento 55

Aferição do EPIC 58

Procedimento de aferição 58

Análise de Resultados 60

- Conclusões parciais- Aferição do EPIC 63

Capítulo 6 – Conclusões e Sugestão de Trabalhos Futuros 64

Conclusões 64

Sugestão de Trabalhos Futuros 65

Referências 66

Anexo A. Viscosidade de Mooney 71

Anexo B. Varrimento em Deformação 73

Anexo C. Resultados individuais: Teste B. 77

Anexo D. Resultados individuais: Teste C 91

Lista de abreviaturas e siglas

RMEA	Special System Settings for Tread Extrusion Lines
EPIX	Extrusion Process Intelligent Controller
Workoff	Produtos não-conformes
MU	Unidades de viscosidade de Mooney
RPA	Rubber Process Analyzer
S*	Binário complexo
S'	Componente elástica do binário
S''	Componente viscosa de binário
G'	Módulo elástico
G''	Módulo Viscoso
α	Ângulo entre blocos
γ	Deformação aplicada
δ	Angulo de desfasamento
$\overline{T}_{i\%}$	Temperatura média de todo o perfil
$T_{estável}$	Temperatura estável
i	Instantes de tempo
N	Número de medições
$Desvio_{i\%}$	Diferença (entre Temperatura média de todo o perfil e Temperatura estável)
DAM	Desvio médio absoluto
Li	Largura Inicial

L Nominal	Largura Nominal
PNC	Parcialmente não conforme (Largura)
C	Conforme (Largura)
T_L	Tolerância de largura
$T_{R, max}$	Tempo máximo sem reação
T_R	Tempo de reação
V_{inc}	Sinal de incremento de velocidade de linha
dMI	Fator proporcional de incremento de velocidade de rotação dos fusos.

Índice de figuras

Figura 1- Sedes e Unidades Fabris da Continental AG[1] 1

Figura 2- Composição e componentes de um pneu (adaptado de [5]). 3

Figura 3- **(A)** Corte de secção transversal do piso extrudido; **(B)** Corte de secção transversal de um pneu após vulcanização (adaptado de [10]) 4

Figura 4- Zonas geométricas do piso de um pneu. 5

Figura 5-Esquema das substâncias necessárias à formulação de um composto de borracha 5

Figura 6-Cronologia dos estágios da produção de um pneu 6

Figura 7- Etapa de misturação (adaptado de [15]). 7

Figura 8- Junção dos elementos que formam o pneu em verde. 7

Figura 9- Linha de co-extrusão (Continental Mabor)[17] 8

Figura 10-Estrutura do sistema de alimentação das extrusoras e da cabeça de extrusão[18] 9

Figura 11- Corte longitudinal **(A)** e transversal **(B)** de uma extrusora com pinos[20] 9

Figura 12- Esquema do canal de fluxo deste a saída das extrusoras até à fieira.(adaptado)[21] 10

Figura 13- Cabeça da co-extrusora e passadeira de relaxação 10

Figura 14- Marcação de linhas coloridas 11

Figura 15-Tanques 12

Figura 16-Lámina de corte 12

Figura 17-Secadores 12

Figura 18- Exemplo de uma fieira para a produção de pisos. 13

Figura 19- Função rampa do sistema de controlo-RMEA 14

Figura 20- Taxa de geração de workoff média anual do total da produção. 15

Figura 21- Taxa de geração de workoff média anual de cada elemento do pneu. 15

Figura 22- Fluxograma ilustrativo da organização da presente dissertação e respetivos trabalhos desenvolvidos 17

Figura 23- Representação da traseira de uma fieira (A) Sem chanfros; (B) Com chanfros. 20

Figura 24- Diagrama causa-efeito de estabilidade dimensional 25

Figura 25- Esquema da metodologia adotada na recolha de amostras de matéria prima. 28

Figura 26- Forma das amostras cortadas a partir da matéria prima recolhida. 29

Figura 27- MV2000 ALPHATECHNOLOGIE 30

Figura 28-Cavidade de teste do MV2000 30

Figura 29–Curva típica da viscosidade de Mooney (Adaptado de [71]). 31

Figura 30- RPA 2000 ALPHA TECHNOLOGIES (Adaptado de [76]). 32

Figura 31-Cavidade de teste RPA2000**.** 32

Figura 32 - Cavidade do teste de RPA (Adaptado de [78]). 32

Figura 33 - Resposta de binário dado uma deformação sinusoidal(Adaptado de [78]). 33

Figura 34- Curvas típicas de um varrimento em deformação (Adaptado de [85]). 35

Figura 35- Curvas típicas de um varrimento em frequência (Adaptado de [88]). 36

Figura 36- Esquema ilustrativo do procedimento de avaliação do perfil de temperatura do extrudido. 37

Figura 37- Imagem termográfica captura com a câmara FLIR i7 38
Figura 38- Exemplo de perfil de temperatura obtido com a função linha. 38
Figura 39- Junção de todos os perfis de temperatura obtidos no total de uma corrida de extrusão 39
Figura 40- Perfis de temperatura obtidos após interpolação. 40
Figura 41- Evolução da temperatura média dos perfis com o tempo de co-extrusão**.** 40
Figura 42- Erro associado à largura inicial em função do tempo de co-extrusão; **(A**) Largura parcialmente não conforme; **(B)** Largura conforme. 42
Figura 43- Estação de controlo inicial e respetivos equipamentos associados. 44
Figura 44-Exemplo da construção de gráficos representativos do erro associado à largura inicial com a evolução da velocidade de linha como variável de controlo. 45
Figura 45- Curvas de viscosidade de Mooney dos compostos T01130 e T14030 testados antes e depois da extrusora. ... 46
Figura 46- Curvas dos módulos elástico (G') e viscoso (G'') em função da amplitude de deformação; **(A)** Referente ao composto de Capa (T14030); **(B)** Referente ao composto de Base (T01139). 48
Figura 47- Evolução da temperatura média dos perfis com o tempo de co-extrusão, de todos os pisos produzidos. 50
Figura 48- Exemplo de resultados obtidos do erro associado à largura inicial do perfil em função da velocidade de linha controlado pelo sistema RMEA. 52
Figura 49- Tipo de função rampa dos controlos inteligentes do processo. 56
Figura 50- Fluxograma do processo de controlo da largura inicial-EPIC 57
Figura 51- (A) Interface utilizador-máquina; **(B)** Câmara de verificação de largura inicial. 59
Figura 52- Testes de simulação da aceleração da rampa de velocidades de linha com recurso à funcionalidade manual do RMEA; **(A**) Teste 1; **(B)** Teste 2 ; **(C)** Teste 3; **(D)** Teste 4. 61

Índice de tabelas

Tabela 1- Principais parâmetros do processo: RMEA 13
Tabela 2- Variáveis governadas pelo controlo dimensional do sistema RMEA 14
Tabela 3-Materiais utilizados nos Testes A e C 27
Tabela 4- Materiais utilizados no Teste B..... 27
Tabela 5-Condições de extrusão utilizadas na recolha de amostras..... 29
Tabela 6-Condições do ensaio de viscosidade de Mooney..... 31
Tabela 7- Etapas e condições do teste de varrimento em amplitude de formação. 34
Tabela 8- Etapas e condições do teste de varrimento em frequência..... 35
Tabela 9-Códigos associados aos pisos selecionados para o estudo. 37
Tabela 10-Condições de co-extrusão dos artigos acompanhados na avaliação do perfil de temperatura do extrudido..... 43
Tabela 11- Condições de extrusão do piso de código 806 45
Tabela 12- Correlação uniformidade da variável largura inicial e desvio absoluto médio à temperatura estável 51
Tabela 13-Percentagem de pisos rejeitados no processo de diagnóstico do sistema RMEA 53
Tabela 14- Comparação das funcionalidades em défice VS desejadas para o sistema de controlo inteligente 55
Tabela 15- Percentagem de pisos rejeitados consoante o tipo de rampa de aceleração 62

Capítulo 1 - Introdução Geral

Este capítulo tem como objetivo apresentar a empresa onde foi realizado o presente projeto de mestrado, fazer uma breve contextualização do tema e o enquadramento relevante para os trabalhos relatados nos capítulos posteriores. Assim, será abordada a relevância do tema em estudo e a motivação. Terminando com a identificação do principal objetivo da presente dissertação e a respetiva estrutura.

1.1 Apresentação da Empresa

A Continental Mabor, a empresa associada ao presente projeto de mestrado, integra o Grupo Continental AG, que foi fundado em Hannover (Alemanha) em outubro de 1871. Na sua origem dedicava-se ao fabrico artefactos de borracha flexível e pneus maciços para carruagens. Em 1898, iniciou a produção de pneus lisos (sem relevo de piso) para automóveis. A partir de então, a empresa acompanha a evolução verificada na indústria automóvel com o estudo e aplicação de técnicas, produtos e equipamento para a melhoria de pneus. O Grupo Continental é especialista na produção de sistemas de travagem, controlos dinâmicos para viaturas, tecnologias de transmissão de potência, sistemas eletrónicos e sensores. Esta marca, de referência na indústria automóvel, conta atualmente com uma vasta rede de fábricas distribuídas por todo o mundo (ver Figura 1).

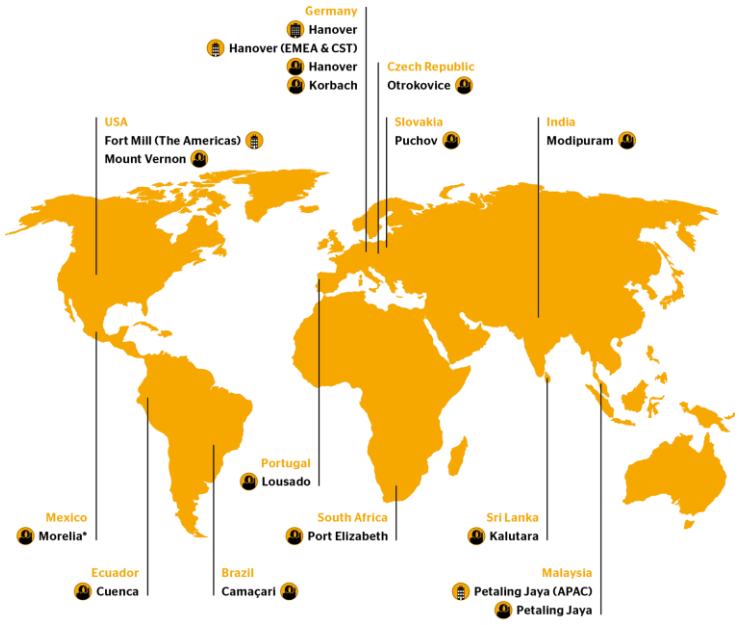


Figura 1- Sedes e Unidades Fabris da Continental AG[1]

A Continental Mabor nasceu em dezembro de 1989, como "joint venture" entre a Continental AG (60%) e a Mabor - Manufatura Nacional de Borracha, S.A. (40%), produtora de pneus em Portugal, desde 1946. Em novembro de 1993, por aquisição das restantes ações, a Continental Mabor passou a pertencer a 100% ao grupo alemão. O que constituiu, à data, um dos maiores investimentos estrangeiros em Portugal, possível pela ação decisiva dos contraentes, pelos apoios recebidos e pelo cumprimento rigoroso de um extenso programa de reestruturação que levou cerca de cinco anos a concluir. Durante esses 5 anos, foram investidos nas antigas instalações fabris da MABOR, 148 milhões de euros, totalizando o investimento industrial bruto, 144 milhões de euros [2].

Simultaneamente, foram criadas estruturas da organização e promovidas ações de formação a todo o pessoal. Estas medidas proporcionaram a passagem de 5.000 pneus/dia em 1990 para os 26.000 pneus/dia em 1996. Entre 1996 e 2000 ocorreu mais um projeto de expansão onde foram investidos cerca de 90 milhões de euros, que permitiram a passagem de 26.000 pneus/dia para os 33.000 pneus/dia em 2000. Entre 2000 e 2003 foi desenvolvido um novo projeto de expansão que permitiu à Continental Mabor passar de 33.000 pneus/dia para os 42.000 pneus/dia [3].

Desde 2003 até à presente data ocorreram várias alterações estruturais associadas a projetos de expansão. No decorrer do ano de 2016, teve início o projeto CST (LousAgro), que permitiu a entrada num mercado distinto dos atualmente cobertos, e até agora inacessível, dos pneus com características especiais denominados internamente por CST – Commercial Specialty Tires, nomeadamente pneus para serem utilizados em máquinas da indústria agrícola[4].

1.2 Contextualização teórica

1.2.1 Estrutura do Pneu

O pneu é uma estrutura complexa cuidadosamente projetada de forma a atender as solicitações a que está submetido em serviço, tais como a segurança do veículo, estabilidade da viatura, suporte de carga, resistência às sobrecargas dinâmicas produzidas nas acelerações e travagens, amortecimento dos choques causados pelas irregularidades das estradas, entre outros, pelo que tem de ser fabricado com o máximo rigor e qualidade. Para cumprir os referidos requisitos, num único pneu, típico para veículos de passageiros, existem 20 ou mais componentes, com 15 ou mais compostos de borracha [6,7].



1. Piso
2. Cinta têxtil
3. Cinta metálica
4. Tela têxtil
5. Camada estanque
6. Parede lateral
7. Cunha do talão
8. Reforço do talão
9. Núcleo do talão

Figura 2- Composição e componentes de um pneu (adaptado de [5]).

Conforme ilustrado na Figura 2, na composição do pneu para automóveis de passageiros destacam-se várias camadas entre as quais piso (1), cinta têxtil (2), cinta metálica (3), tela têxtil (4), camada estanque(5), parede lateral(6) e o talão(7,8 e 9) [8].

Como primeiro elemento surge o piso (1), o elemento mais externo do pneu, que está em contacto direto com a estrada. A cinta têxtil (2), trata-se de uma tela de poliamida revestida com borracha, o que impede a expansão do pneu a altas velocidades [7]. A cinta metálica (3) contem fios metálicos impregnados com borracha que permitem reforçar o pneu, no respeitante à estabilidade direcional [9]. A tela têxtil (4) é constituída por poliéster ou outro tipo de material e são revestidas por borracha, tem como objetivo ajudar ao reforço estrutural do pneu. A camada estanque (5) é uma camada de borracha extrudida, que deve assegurar uma baixa permeabilidade ao ar, comummente designada por câmara-de-

ar nos pneus. A parede (6) corresponde a um perfil extrudido espesso e é responsável pela resistência à abrasão da parte lateral do pneu. A cunha de talão (7) é composta por borracha sintética e fornece estabilidade direcional, melhorando a precisão na condução e o conforto. O núcleo de talão (9) é constituído por filamentos de aço cobertos de borracha, os quais têm como finalidade que o pneu se fixe na jante do veículo. O reforço de talão (8) trata-se de uma camada cuja constituição engloba fios têxteis, tais como poliamida, revestidos com borracha, e tem como função melhorar o conforto da condução [6,8].

1.2.2 Piso

O piso é o produto semiacabado abordado neste projeto. Como é possível verificar na Figura 3, o piso apresenta uma distribuição típica/desejada das diferentes camadas de borracha que o constituem, este identifica-se pelo seu perfil de secção transversal ilustrado na Figura 3 (A). Quando montados todos os elementos do pneu e após sofrer vulcanização, o piso terá um aspeto como o apresentado na Figura 3 (B), com o relevo e padrão do pneu visíveis.

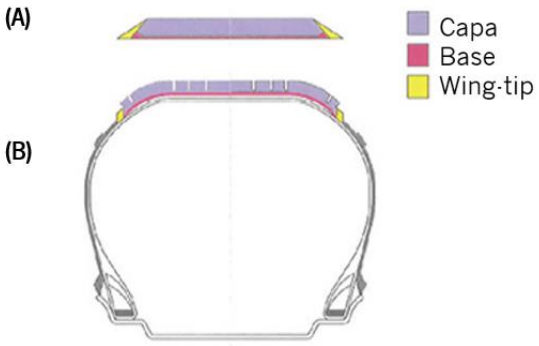


Figura 3- **(A)** Corte de secção transversal do piso extrudido; **(B)** Corte de secção transversal de um pneu após vulcanização (adaptado de [10])

Na composição do piso, cada composto ocupa uma região específica e desempenha uma função distinta no pneu. O composto da região "Capa" contacta diretamente com a estrada e tem como funções a adesão aos vários tipos de estrada e proporcionar resistência ao desgaste e estabilidade direcional. A região do composto de "Base" tem como função evitar a passagem de calor da estrada para a estrutura do pneu e reduzir eventuais danos ao interior do mesmo. A "Wing-tip" ocupa menor área e é essencial para garantir a adesão do piso ao material do elemento parede lateral do pneu. Consequentemente, os compostos que ocupam esta distribuição, resultam de receitas de composto distintas, cada um com propriedades adequadas às referidas funções. Como é possível observar através da Figura 4, o piso pode ainda ser dividido em duas zonas geométricas: "ombro" e "centro".

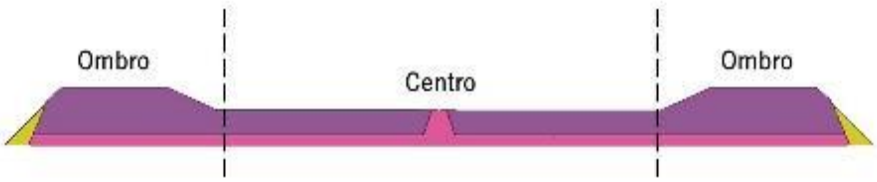


Figura 4- Zonas geométricas do piso de um pneu.

1.2.3 Formulação de Compostos de Borracha

Dentro dos vários componentes utilizados na manufatura de pneus, os compostos de borracha são os mais comuns. Para cada componente de pneu é especificada uma formulação que irá permitir produzir um composto de borracha com propriedades desejadas. A formulação de um composto integra, habitualmente, polímeros, cargas, agentes de proteção, agentes de vulcanização e auxiliares de processamento, como ilustrado na Figura 5 [11,12]. Cada uma das substâncias presentes no composto tem uma determinada função, e diferentes propriedades reológicas, que afetam o seu processamento, as características finais do produto e o custo do mesmo.



Figura 5-Esquema das substâncias necessárias à formulação de um composto de borracha

A formulação de um composto, é constituída em maior parte por polímeros. Na indústria, são utilizados dois tipos de elastómeros, a borracha natural (NR) e as borrachas sintéticas [12,13].

As cargas, são matérias primas que se adicionam à formulação dos compostos de borracha para lhes conceder melhores propriedades mecânicas. As principais cargas utilizadas são o negro de fumo, a sílica e o carbonato de cálcio[12]. É essencial garantir uma boa dispersão das cargas na mistura, de forma a garantir um reforço eficaz.

Para prolongar a vida útil do produto acabado, é muito importante protegê-lo da deterioração os compostos, quando estes se encontram expostos a condições climatéricas adversas, ao oxigénio, ozono, luz e calor. Assim, utilizam-se agentes de proteção como antioxidantes, antiozonantes e ceras [14].

Para garantir a vulcanização, isto é, a alteração da estrutura química da borracha na presença de calor, através da criação de ligações cruzadas, é necessário um sistema de vulcanização. Assim, o sistema de vulcanização é constituído por: agentes de vulcanização, promotores de reação, um ativador, um acelerador e um retardador [12,14].

Na receita de um composto são também empregues ajudantes de processamento, que habitualmente se agregam em: óleos e resinas. Os óleos, como amaciadores melhoram a dispersão de cargas durante a mistura, e as resinas controlam o nível de adesão da borracha processada [12].

1.2.4 Processo Produtivo

O processo de produção do pneu está dividido em cinco estágios diferentes.



Figura 6-Cronologia dos estágios da produção de um pneu

Como ilustrado na Figura 6 , a produção de um pneu é constituída cronologicamente por uma etapa de misturação, preparação, construção, vulcanização e inspeção final.

Para dar início á etapa da misturação é necessário que exista uma verificação, controlo e aprovação de todas as matérias-primas com origem nos fornecedores. Posto isto, segue-se a produção dos compostos de borracha cuja formulação foi descrita na secção anterior. Assim, as várias matérias-primas são pesadas e adicionadas ao misturador, em vários estágios. À saída do misturador, o composto segue para um moinho ou calandra de forma a adquirir a forma de "folhas" de borracha, o que facilita o armazenamento em paletes, após o seu arrefecimento, ver Figura 7.

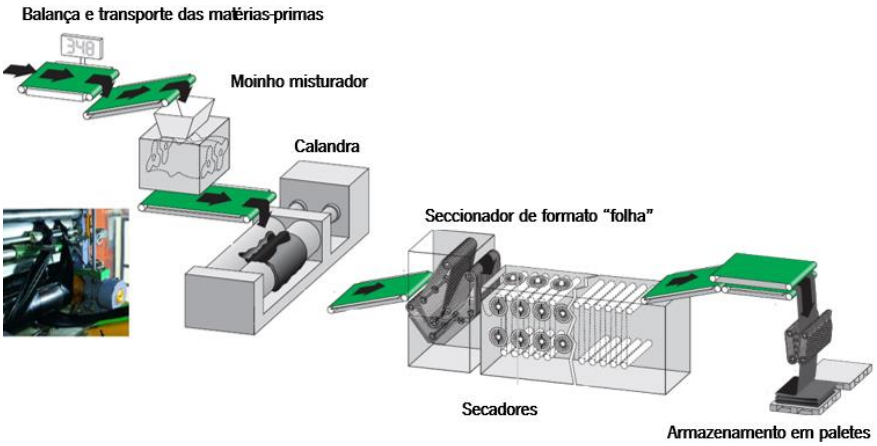


Figura 7- Etapa de misturação (adaptado de [15]).

A etapa de preparação, é constituída pelos subprocessos de preparação a frio e a quente, que têm como principal função preparar o material necessário à formação do pneu de acordo com as suas especificações. A preparação a quente é responsável pelo fabrico de talões, paredes e pisos. Enquanto a preparação a frio integra a preparação das cintas têxtil e metálica. Após a preparação de todos componentes intermediários, prossegue-se para a construção do pneu em verde, não vulcanizado, onde se dá a junção de todos os componentes já mencionados. Inicialmente forma-se a carcaça, composta pela camada estanque, tela têxtil, talão e parede (ver Figura 8). De seguida, à carcaça adicionam-se as cintas, metálica e têxtil, e o piso.

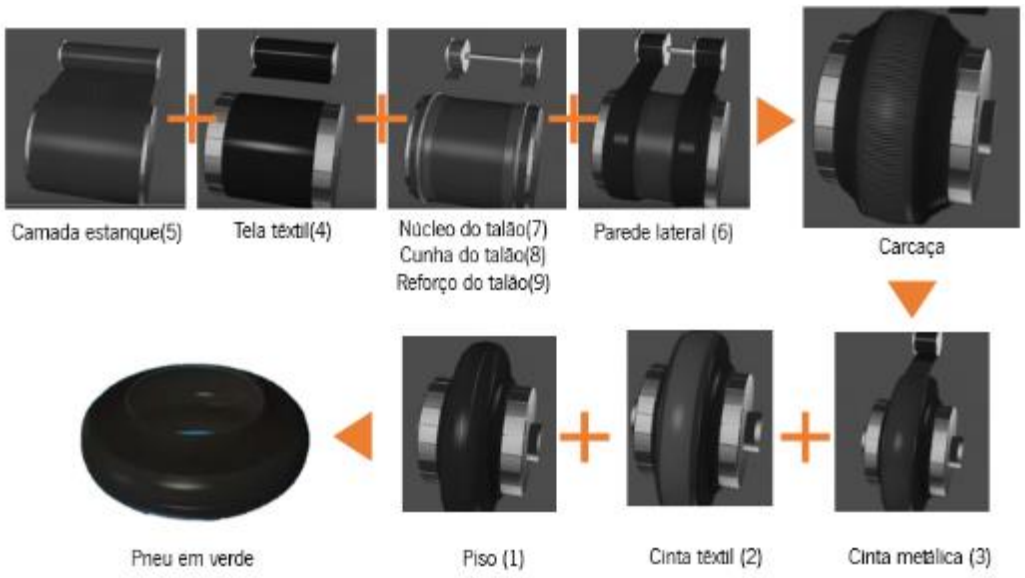


Figura 8- Junção dos elementos que formam o pneu em verde.

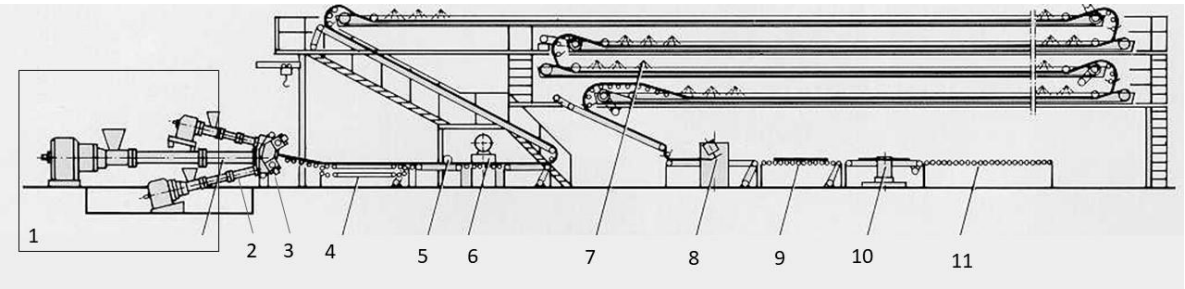
Na etapa da Vulcanização, o pneu em verde é colocado num diafragma, onde circula vapor de água a elevada pressão e temperatura. O molde fecha sobre o pneu em verde e ocorre a vulcanização do pneu. O molde possui o padrão em relevo que se irá gravar no piso, assim como as inscrições a colocar na parede. Por fim, é realizada uma inspeção visual e automática de forma a garantir que o pneu

cumpre todas as especificações e todas as normas de qualidade e segurança. Após passar a inspeção o pneu é armazenado para posterior distribuição.

1.2.5 Co-extrusão de Pisos

O processo de co-extrusão pode ser considerado, atualmente, como um dos processos de transformação mais importantes da Indústria da Borracha [8]. A co-extrusão caracteriza-se pela extrusão simultânea de várias camadas de matéria prima com características próprias que se complementam por forma a obter um perfil continuo, com determinada geometria da secção transversal [16].

O elemento em estudo, o piso do pneu descrito na Secção 1.2.2. resulta da combinação de 3 compostos distintos de borracha e, portanto, é produzido através do processo de co-extrusão. A linha de co-extrusão utilizada para os trabalhos realizados na presente dissertação trata-se de uma triplex, ou seja, integra 3 extrusoras. A linha está ilustrada na Figura 9 e os componentes principais da linha. serão descritos em detalhe após a figura.



1- Zona de alimentação
2- Extrusoras
3- Cabeça da co-extrusora
4- Passadeira de relaxação de tensões
5- Marcação de linhas
6- Balança massa linear e câmara de verificação da Largura inicial
7- Tanques de arrefecimento
8- Corte ao comprimento
9- Passadeira de sopradores de secagem
10- Balança e Câmara de Verificação das dimensões finais: Massa linear final, Largura final e Comprimento
11- Armazenamento automático

Figura 9- Linha de co-extrusão (Continental Mabor)[17]

- **Zona de alimentação**

A produção na linha inicia com a etapa de alimentação.

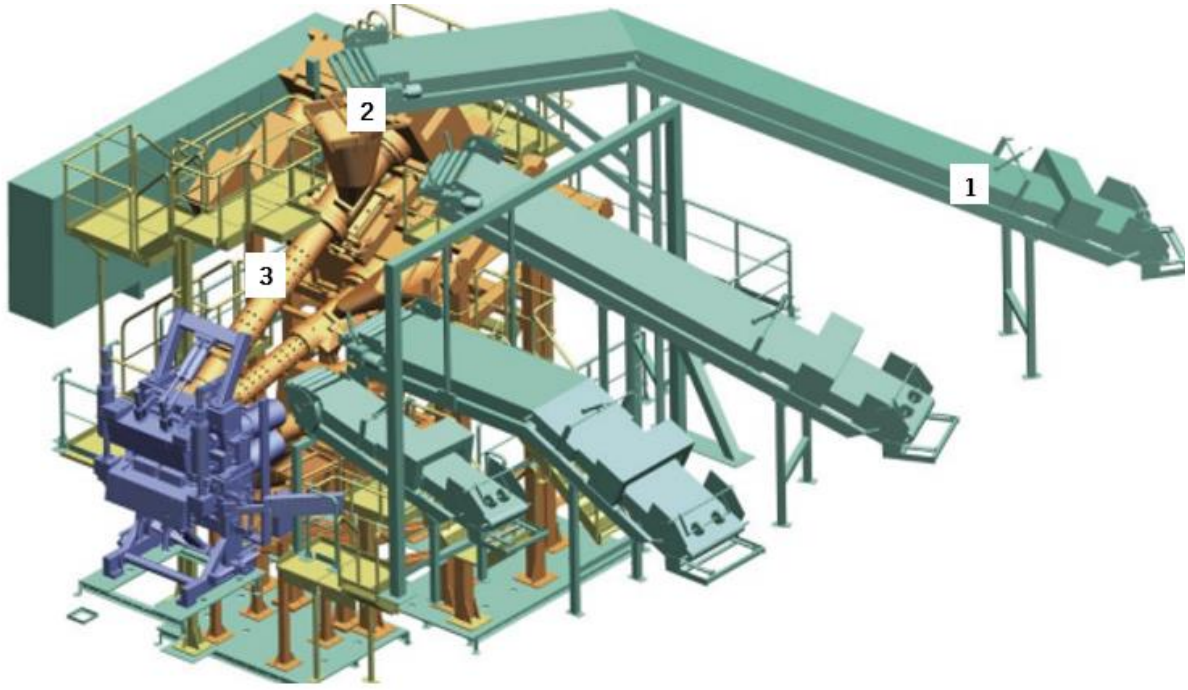


Figura 10-Estrutura do sistema de alimentação das extrusoras e da cabeça de extrusão[18]

A Figura 10 ilustra toda a estrutura do equipamento utilizado num sistema de alimentação. A numeração (1,2 e 3) indica o caminho que o composto segue para alimentar uma extrusora, sendo que a alimentação é feita de forma simultânea para as 3 extrusoras

- **Extrusoras**

Terminada a etapa de alimentação, dentro das extrusoras (3), os compostos encontram os respetivos parafusos rotativos sem-fim, responsáveis pela plasticização, mistura, quebra de aglomerados e transporte do material. A parede do cilindro da extrusora é composta por pinos, como ilustrado na Figura 11, cuja temperatura e formato ajudam a plasticizar, homogeneizar e rasgar o composto em pasta, o que facilita o escoamento do mesmo ao longo do comprimento do fuso [19].

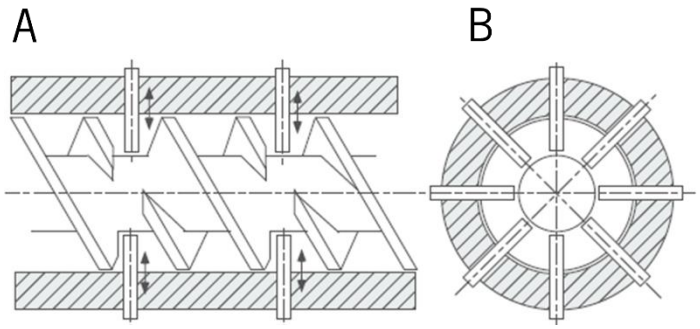


Figura 11- Corte longitudinal **(A)** e transversal **(B)** de uma extrusora com pinos[20]

- **Cabeça da co-extrusora**

Após as extrusoras, o composto encontra o respetivo canal de alimentação (1,2 e 3) (ver Figura 12). A pré-fieira (4) é posicionada em frente aos canais de alimentação e tem como função guiar e unir o composto de Capa, Base e Wing-tip num único fluxo de massa à entrada da fieira (5), dando origem ao perfil (6).

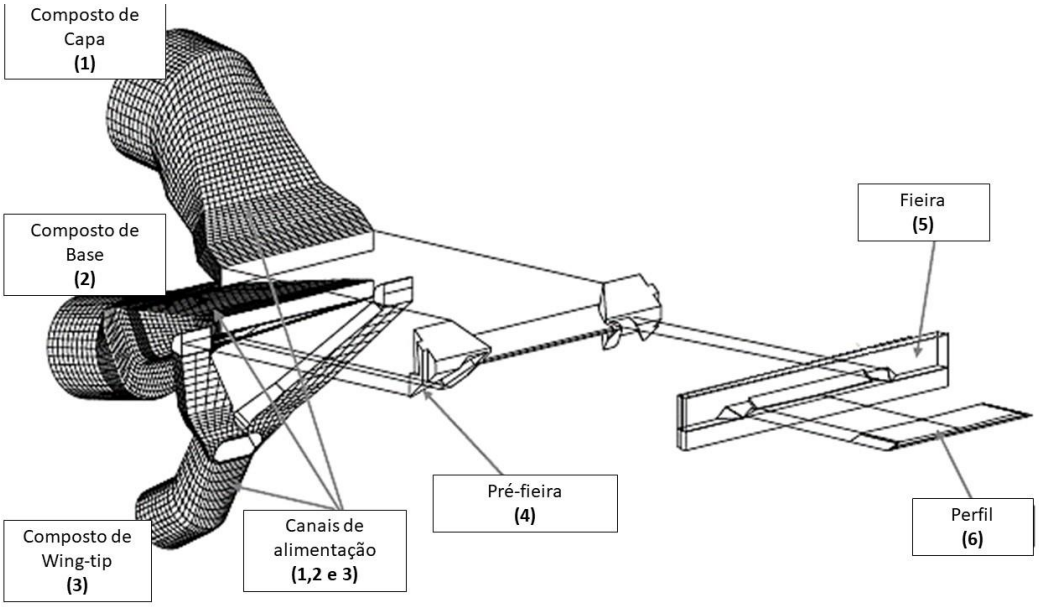


Figura 12- Esquema do canal de fluxo deste a saída das extrusoras até à fieira.(adaptado)[21]

- **Passadeira de relaxação**

Á saída da fieira o piso extrudido contacta a primeira passadeira, denominada passadeira de relaxação de tensões (Figura 13), esta passadeira é composta por um conjunto de rolos que transportam o piso extrudido a uma velocidade controlada para não estirar o piso e evitar induzir tensões ao extrudido que posteriormente resultam numa contração longitudinal do comprimento do extrudido[22].



Figura 13- Cabeça da co-extrusora e passadeira de relaxação

- **Zona de marcação**

A zona de marcação (Ver Figura 14), consiste na marcação de linhas no piso o que permite a identificação deste ao longo do processo de produção do pneu.



Figura 14- Marcação de linhas coloridas

- **Balança de massa linear e câmara de verificação de largura inicial.**

Após a marcação de linhas coloridas o piso passa pela primeira estação de controlo das variáveis especificadas. Esse local integra uma câmara de leitura da largura que mede a largura do piso no início da linha enviando informação ao sistema de controlo sobre a leitura realizada. Para além do controlo da largura inicial, a massa linear do piso é controlada com uma balança.

- **Tanques de arrefecimento**

Posteriormente o piso segue para os patamares mais elevados da linha, onde é submerso em tanques de água e arrefece (ver Figura 15).

- **Lâmina de corte ao comprimento**

Subsequentemente à passagem nos tanques de água, o extrudido encontra a lâmina de corte que é responsável pelo corte do piso no comprimento nominal estabelecido (ver Figura 16).

- **Secadores**

Ao fim do corte procede-se à secagem do piso seccionado por convecção forçada de ar, promovida por secadores (ver Figura 17).

- **Balança e câmara de verificação das dimensões finais**

No fim da linha o piso passa pela última estação de controlo das especificações. Esta estação conta com uma câmara de verificação da largura e comprimentos do piso e com uma balança de medição da massa linear por piso.



Figura 15-Tanques



Figura 16-Lámina de corte



Figura 17-Secadores

- **Armazenamento automático**

O armazenamento dos pisos é realizado de forma automática segregando os pisos que não cumprem as especificações para as 3 variáveis.

1.2.6 Fieiras

A conceção de fieiras é um trabalho complexo, esta complexidade resulta sobretudo, da complexidade da geometria da secção pretendida, da complexa reologia dos compostos de borracha, etc. [23]. O ponto de partida da conceção de uma feira é o perfil de secção transversal nominal do piso requisitado pelo cliente. A partir do perfil de secção transversal nominal do piso, o técnico cria e maquina um perfil na fieira, em conformidade com o perfil de secção transversal nominal do piso desejado. A conceção da fieira é um processo essencialmente de tentativa erro. A fieira é aprovada para produção se o perfil de secção transversal nominal do piso cumprir as tolerâncias dimensionais especificadas pela empresa:

Largura nominal: ± 3 mm;

Perfil de espessuras nominal: ± 0,5 mm;

Massa linear: ± 3,75% da massa linear nominal.

A Figura 18 mostra a aparência típica de uma fieira utilizada na co-extrusão de pisos.

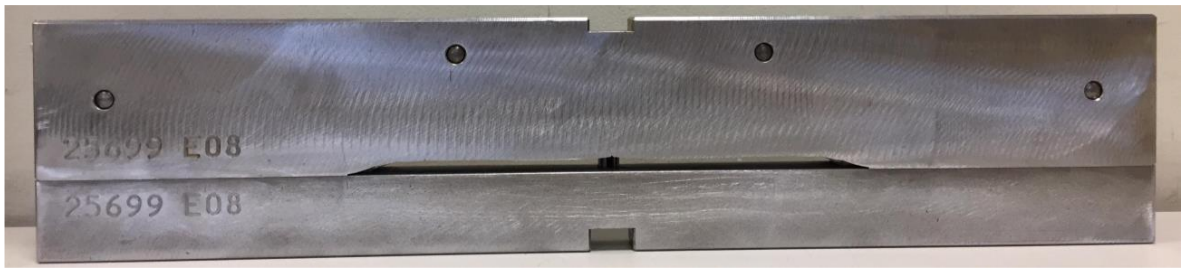


Figura 18- Exemplo de uma fieira para a produção de pisos.

1.2.7 Processamento inteligente

Diferentes abordagens são utilizadas para reduzir a ineficiência e os custos associados ao processo de extrusão. O "Processamento Inteligente" é um tipo de abordagem que recorre a sistemas dotados de algoritmos pré-programados. Estes, possuem rotinas de controlo pré-definidas que controlam as condições de processamento para produzir produtos sem a necessidade de intervenção dos operadores. A Continental Mabor, utiliza uma tecnologia denominada de *RMEA – Special System Settings for Tread Extrusion Lines,* desenvolvida pela *FLS Fuzzy Logik & Neuro Systeme GmbH* empresa do grupo *PSI Software.* [24]

RMEA – Special System Settings for Tread Extrusion Lines

O sistema *RMEA* é uma ferramenta desenvolvida para regulação do processo de co-extrusão em toda a linha. Esta ferramenta permite a monitorização e o controlo manual ou automático de determinados parâmetros do processo de modo a prevenir variações indesejadas. O painel de controlo do *RMEA* permite registar na base de dados os parâmetros relevantes do processo e dos produtos extrudidos. Desta forma é possível visualizar (em linha ou posteriormente) todos os parâmetros do processo. Estes, podem distinguir-se entre valores de entrada (valores de receita) ou valores de saída (os monitorizados com sensores ao longo do processo). Os valores de saída são registados com uma frequência de 1 Hz.

Tabela 1- Principais parâmetros do processo: RMEA

Valores de entrada (Receita)	**Valores de saída (Leitura online)**
Matéria prima	Velocidades do processo (m/min)
Temperaturas do processo	Parâmetros do piso:
Velocidades nominais do processo	Largura Inicial (mm)
Especificações do perfil	Massa linear (kg/m)
	Largura final (mm)
	Massa final por piso (kg)
	Comprimento do piso (mm)

Em termos de controlo dimensional, o sistema gere as duas estações de controlo descritas na secção anterior, na descrição da linha (Figura 9). As principais variáveis do controlo dimensional que o sistema controla são:

Tabela 2- Variáveis governadas pelo controlo dimensional do sistema RMEA

Primeira estação de controlo	Segunda e última estação de controlo
Largura Inicial (mm)	Largura Final (mm)
Massa linear (kg/m)	Massa por Piso (kg)
	Comprimento (mm)

A partir do momento em que o processo de co-extrusão inicia, o sistema ativa uma função denominada Função Rampa (FR). Executar a FR significa que a velocidade linear da linha (V) e a velocidade de rotação dos fusos das extrusoras são acionadas e a aceleração destas é controlada pelo sistema, respeitando uma sequência pré-definida, cuja estrutura típica está ilustrada na Figura 19.

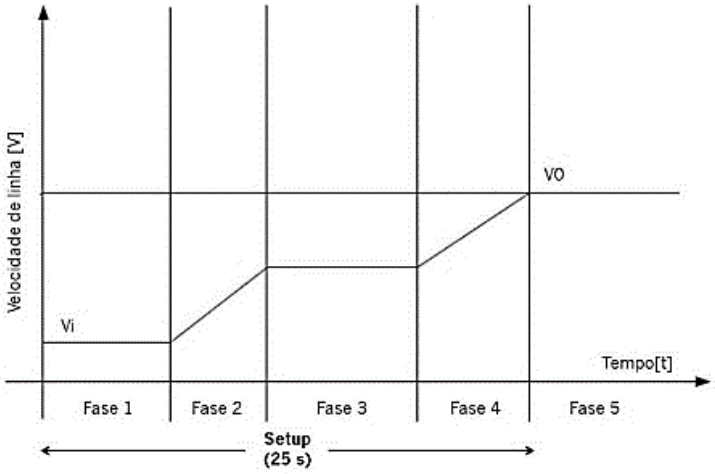


Figura 19- Função rampa do sistema de controlo-RMEA

Como é possível observar pela Figura 19, a função rampa tem um formato típico que se divide em 5 fases. As Fases 1 e 3 correspondem a patamares de estabilização da velocidade linear da linha e as Fases 2 e 4 correspondem a incrementos de velocidade de 2,5 m/min. Já a Fase 5 corresponde apenas ao momento em que se atinge a velocidade linear nominal da linha, neste momento a função rampa é automaticamente desligada. O somatório das 5 fases (fase de *setup*) corresponde, em média, a 25 segundos. Paralelamente, as velocidades de rotação dos parafusos das extrusoras vão sofrendo incrementos contínuos de 2% do valor da velocidade de rotação inicial, desde os valores de velocidade de rotação iniciais até atingir a velocidade de rotação nominal.

Estação de controlo inicial

A partir do momento em que termina a rampa, a co-extrusão entra em modo automático, sendo somente nessa altura que os controladores que governam o controlo dimensional são acionados. O controlador de largura inicial recebe o sinal da leitura realizada pela câmara e, caso a largura não esteja entre os limites especificados (±3mm), o sistema atua alterando a velocidade de linha, para corrigir o problema. Já o controlador de massa linear, recebe o sinal da leitura realizada pela passadeira/balança, verifica a massa linear lida e atua sobre as velocidades de rotação dos fusos, caso a massa linear não esteja dentro dos limites nominais especificados (±3,75% da massa linear nominal).

Estação de controlo final

Além das funções que gerem o controlo dimensional dos pisos na estação de controlo inicial da linha, o RMEA também monitoriza a estação de controlo final da linha segregando os pisos que não cumprem os requisitos nominais das variáveis de final de linha, que no caso são a massa por unidade de piso, a largura final e o comprimento.

1.3 Motivação

Quando existem não-conformidades face aos requisitos nominais estabelecidos para os vários processos, existe uma segregação dos produtos que é efetuada pelas ferramentas de controlo da produção em geral. Produtos não-conformes, internamente são denominados por *workoff*. No último ano, o desperdício médio gerado– taxa de *workoff*- foi cerca de 12%, como ilustrado na Figura 20. O *workoff* implica dispêndio desnecessário de tempo e recursos financeiros, e acarreta uma sobrecarga de produção. Através de uma recolha de dados realizada nos registos históricos da empresa, ilustrada abaixo na Figura 21, foi possível identificar que o componente piso é o componente com uma maior presença na quantidade de *workoff* gerada.

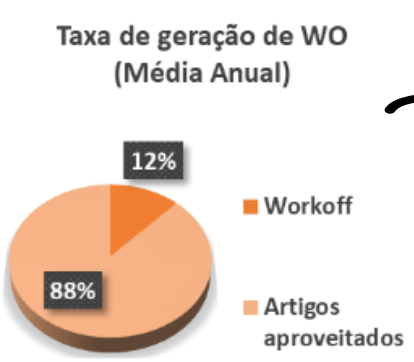


Figura 20- Taxa de geração de workoff média anual do total da produção.

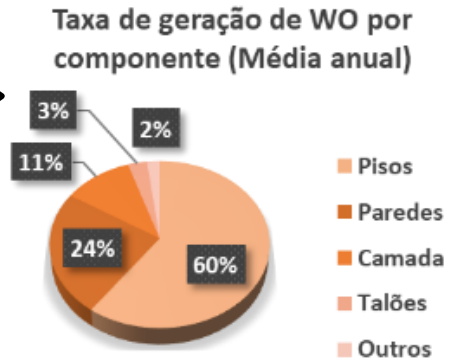


Figura 21- Taxa de geração de workoff média anual de cada elemento do pneu.

1.4 Objetivos

A proposta de dissertação motivada pela Continental Mabor- Indústria de Pneus visava reduzir significativamente a quantidade de *workoff* gerada na empresa, na área da co-extrusão de pisos. Posto isto, investigou-se quais as principais origens do *workoff* no processo de produção de pisos, e foi verificou-se que a instabilidade dimensional dos pisos em termos de largura era um problema muito recorrente. Assim, decidiu-se estudar as variáveis do processo que têm influência na variabilidade dimensional dos artigos extrudidos, em concreto na largura, por forma a determinar novas estratégia de otimização do processo de co-extrusão.

1.5 Organização da Dissertação

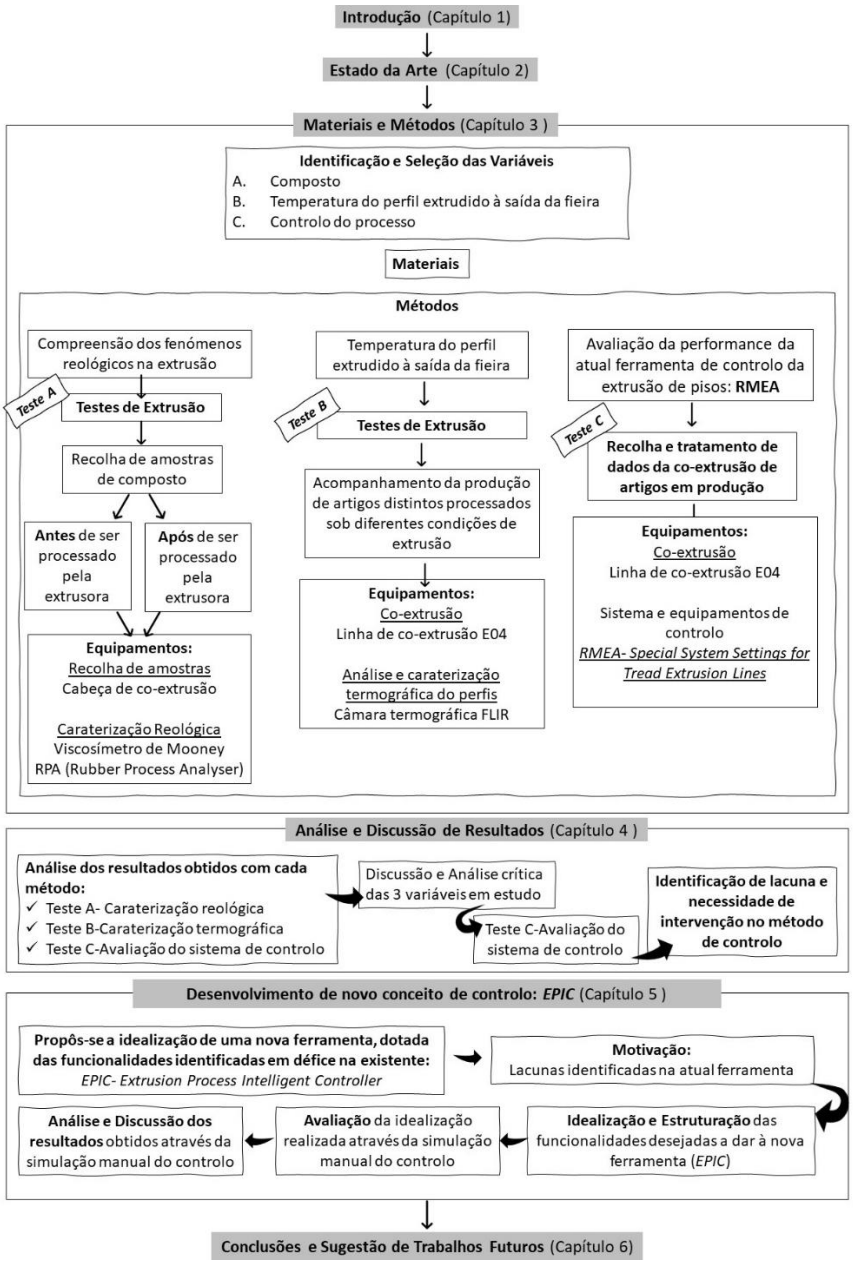


Figura 22- Fluxograma ilustrativo da organização da presente dissertação e respetivos trabalhos desenvolvidos

A Figura 22 apresenta o fluxograma da organização da presente dissertação e respetivos trabalhos desenvolvidos, que visa facilitar a compreensão do procedimento empregue no trabalho de mestrado e a relação com a estrutura da dissertação.

Esta dissertação está organizada do seguinte modo, o Capítulo 1, "Introdução", apresenta a empresa, faz uma contextualização teórica dos assuntos abordados, apresentando a motivação que deu origem ao presente estudo e qual o objetivo deste.

O Capítulo 2, "Estado da Arte", fornece uma visão geral do estado da arte relevante na temática da presente dissertação. Neste capítulo são apresentados e descritos os vários estudos realizados no âmbito da otimização do processo de co-extrusão.

No Capítulo 3, "Materiais e Métodos", inicialmente identificam-se e selecionam-se as variáveis que se afiguraram dominantes no problema em análise. A segunda parte, apresenta e justifica a seleção dos materiais utilizados no estudo. Por último, a terceira parte descreve de forma pormenorizada, os 3 testes e respetivas metodologias/procedimentos adotados no decorrer dos trabalhos, para o estudo e análise das 3 variáveis selecionadas para o estudo.

No Capítulo 4, "Apresentação e Discussão de Resultados" são apresentados e analisados todos os dados obtidos através dos testes realizados e descritos no Capítulo 3.

No Capítulo 5, apresenta-se e discute-se a abordagem proposta para resolver o problema que motivou a presente dissertação. Primeiramente, são apresentadas as lacunas identificadas que motivaram explorar a resolução do problema. Posteriormente, é apresentada a idealização elaborada para a resolução do problema. Por fim apresenta-se e discute-se a metodologia utilizada para aferir a viabilidade da ideia criada.

No Capítulo 6, "Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros", são apresentadas as principais conclusões resultantes do trabalho desenvolvido, sugestões de melhoria, trabalhos futuros e é feita uma reflexão crítica sobre o rumo do desenvolvimento dos trabalhos.

Capítulo 2 – Estado da arte

Este capítulo fornece uma visão geral do estado da arte relevante na temática da presente dissertação. Atendendo a que o objetivo deste trabalho é o estudo e compreensão das diferentes variáveis do processo de produção de perfis co-extrudidos. que afetam a estabilidade dimensional do piso, foram estudados e serão descritos em seguida os vários estudos realizados no âmbito da otimização do processo de co-extrusão. Estes podem não estar diretamente relacionados com aplicações em pneus. Serão também descritos alguns desenvolvimentos implementados pela empresa Continental Mabor, no âmbito de projetos anteriores. Alguns desenvolvimentos não correspondem a estudos publicados. Devido ao facto de a produção de pisos para pneus estar apenas direcionada a uma indústria que representa grande competitividade e sigilo no que corresponde à divulgação das descobertas e desenvolvimentos, o número de artigos científicos com aplicação direta ao estudo levado a cabo nesta dissertação, é muito escasso.

2.1. Estabilidade dimensional de perfis extrudidos

A estabilidade dimensional de um perfil extrudido depende de um conjunto de fatores como: a fieira, os parâmetros de processo, as características da matéria-prima, etc. Neste tópico, introduzem-se os desenvolvimentos e estudos efetuados até à data, que contribuíram para a compreensão e desenvolvimento de técnicas que melhoram a estabilidade dimensional de perfis extrudidos.

2.1.1. Projeto de Fieiras

O projeto de uma fieira representa um processo iterativo, onde são necessárias várias tentativas para se obter a partir da fieira o perfil do extrudido com as dimensões desejadas[25].

De todas as dificuldades encontradas no projeto de fieiras para extrusão de perfis, o balanceamento de fluxo (ou seja, obter velocidade média semelhante em todas as seções à saída da fieira) é um dos maiores desafios [26]. Existem vários parâmetros que podem afetar a distribuição do fluxo à saída da fieira, como por exemplo, o comportamento reológico do material, as condições do processo, a temperatura do fundido, o caudal, a geometria da feira etc. As propriedades reológicas do material desempenham uma parte muito importante na distribuição do fluxo, exigindo, normalmente, um projeto de fieira personalizado para cada produto [27,28]. As abordagens propostas na literatura para resolver este conjunto de problemas, podem ser agrupadas em métodos analíticos, numéricos ou experimentais. A maioria das abordagens propostas na literatura estão relacionadas com condições do processo e materiais muito específicos, distintos dos empregues neste trabalho.

As abordagens por métodos analíticos, recolhidas ao longo da pesquisa bibliográfica realizada, resumem-se essencialmente à obtenção de fórmulas matemáticas, em que são definidas variáveis de entrada para o cálculo de uma ou mais variáveis de saída. Por exemplo, um estudo realizado por *Hopmann e Michaeli* [29], permitiu aos autores, através do cálculo analítico, equilibrar o fluxo em cada seção da fieira alterando o comprimento da zona paralela da fieira e o ângulo de entrada da mesma [29]. Também *Carneiro e Nóbrega* [26], descreveram uma metodologia analítica para projetar uma fieira equilibrada que promove uma velocidade semelhante do fundido à saída da mesma. A metodologia descrita pelos autores consiste em dividir a secção transversal da zona paralela da fieira em secções elementares e analisar estas de forma isolada, equilibrando o fluxo através do ajuste do comprimento da zona paralela [26]. *Tadmor e Gogos* [30] propuseram uma abordagem semelhante, a qual consistia em controlar o fluxo do material através da alteração da zona paralela da fieira. Porém, esta proposta combina os métodos analíticos com as regras obtidas em testes experimentais [30]. As metodologias de base numérica, recorrem geralmente a softwares comerciais de simulação numérica ou a códigos computacionais [31]. Estas metodologias incluem uma a vasta gama de aplicações. Por esta razão, foram já explorados vários métodos alternativos de otimização com recurso a softwares numéricos de simulação, dos quais se destacam, a otimização o da distribuição do fluxo do fundido com a modificação das dimensões dos canais de escoamento, zona paralela e perfil da secção transversal da fieira [32–35].

De entre as metodologias analíticas de obtenção da velocidade média semelhante em todas as regiões da secção transversal à saída da fieira, no campo da otimização do projeto de fieiras, direcionado à co-extrusão de borracha (especificamente pisos para pneus) destaca-se da literatura o estudo de *Kannabiran* [36]. Tendo por base as propriedades reológicas do material, caudal e a geometria dos equipamentos do conjunto (canais de escoamento da cabeça de extrusão, pré-fieira e fieira) foi possível prever as pressões de extrusão, velocidades à saída da fieira e as dimensões do extrudido. Neste estudo foram realizados testes experimentais numa linha de co-extrusão e comparados os resultados experimentais com os resultados estimados através do procedimento de calculo adotado, tendo sido obtida uma boa concordância entre os resultados estimados e os experimentais, sustentando a utilidade do método desenvolvido. Também *Ordieres et al.* [37], estudaram experimentalmente o processo de extrusão de borracha, por forma a compreender e analisar os fenómenos do processo. Com isto os autores desenvolveram um algoritmo, sustentado em métodos numéricos já existentes, de ajuste da geometria final da fieira. O algoritmo implementado permitiu, com sucesso, a identificação de um perfil da fieira ótimo [37].

Uma das estratégias de conceção empregue na Continental, é a implementação de pequenas inclinações na traseira da fieira, usualmente chamadas de chanfros. Estes fazem-se na parte traseira da superfície da fieira o que possibilita o balanceamento do fluxo de material, ou seja, permite obter velocidade média idêntica em todas as seções à saída da fieira, como ilustra a Figura 23. Esta a abordagem corresponde aos ajustes do comprimento de zona paralela, referidos anteriormente.

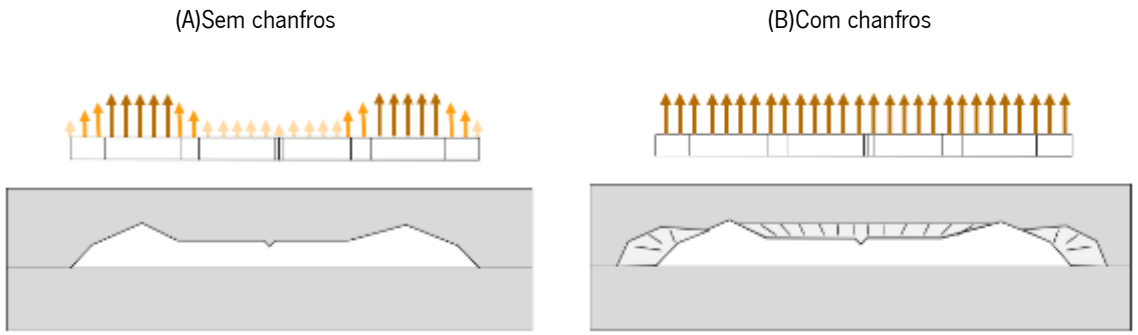


Figura 23- Representação da traseira de uma fieira (A) Sem chanfros; (B) Com chanfros.

Outra consideração importante a ter no projeto de fieira para garantir a obtenção do perfil do extrudido com as dimensões desejadas, é o fenómeno de inchamento do extrudido. Na presença deste fenómeno, verifica-se um aumento nas dimensões da seção transversal do perfil extrudido, quando comparadas com as da secção transversal da fieira, como resultado da recuperação elástica das tensões induzidas pelo escoamento do material, a montante da fieira. A importância do fenómeno, estimulou várias investigações experimentais, teóricas e numéricas [38–44].

Entre as varias investigações realizadas sobre o fenómeno de inchamento, concretamente na área do projeto de fieiras, direcionado à co-extrusão de borracha (especificamente pisos para pneus) destaca-se da literatura o estudo de *Bankar et al.* [45]. Os autores recorreram ao programa de simulação *HyperXtrude* para determinar uma estratégia de compensação do fenómeno de inchamento a saída da fieira. Contudo, neste caso o inchamento resultava somente do rearranjo do perfil de velocidades [45].

Em suma, a otimização e projeto de fieiras de extrusão de perfis ainda é amplamente baseada numa abordagem de "tentativa-e-erro", contudo foram efetuadas etapas muito promissoras para otimizar o projeto destas com o auxílio de programas de simulação e com algoritmos de otimização. No futuro, é provável que o projeto de fieiras para a produção de perfis em materiais cujo comportamento do fluxo possa ser bem descrito matematicamente seja bastante facilitado, se não completamente automatizado [29].

2.1.2. Controlo do processo de extrusão

Os parâmetros de controlo do processo de extrusão desempenham um papel importante na obtenção de qualidade dos produtos extrudidos. No entanto, nenhuma estratégia de controlo é universal, e existem sempre problemas e novas estratégias de melhoria para os defeitos encontrados durante o processo [46]. Esta secção fornece uma visão geral das estratégias de controlo e discute algumas das dificuldades colocadas pela complexidade do processo, assim como, os benefícios potenciais das estratégias desenvolvidas nos vários casos. A estabilidade dimensional de artigos de borracha, obtidos pelo processo de co-extrusão, depende de vários fatores, desde flutuações na velocidade do fuso da extrusora, na velocidade de transporte nas passadeiras e variações de temperatura, que originam variações de viscosidade do composto, induzindo alterações no fluxo de material [47].

Transporte nas passadeiras

O transporte de perfis extrudidos nas passadeiras das linhas de extrusão, representa uma etapa importante para a estabilidade dos perfis extrudidos, especialmente na extrusão de borracha devido às suas propriedades elásticas que se traduzem normalmente em retrações nas peças produzidas [40,48]. Face às necessidades de controlo desta variável, têm sido debatidas possíveis abordagens para as melhorias no ajuste das velocidades de transporte das passadeiras e até do redimensionamento das mesmas [22,49,50].

Bhowmick [22] afirma que as passadeiras de transporte, como parte do sistema e linha de extrusão, devem ser dotadas de controladores de velocidade. Se a passadeira de transporte estirar o perfil extrudido a uma velocidade significativamente mais alta do que a velocidade a que o perfil extrudido emerge naturalmente da fieira, irá induzir tensões ao extrudido que posteriormente resultam numa contração longitudinal do comprimento do extrudido [22].

Moon et al. [49] patenteou um método automático para garantir a precisão dimensional, controlando a espessura e o peso linear do extrudido. O método compreende duas etapas, primeiro a etapa de medir o valor da massa linear do extrudido na balança que interpreta a massa continuamente, e a segunda etapa que consiste em comparar os valores medido e nominal, ajustando a diferença de velocidades entre a primeira e segunda passadeiras de transporte, para corrigir eventuais anomalias. [49].

Recentemente, surgiu uma nova tipologia de passadeiras de transporte, denominada *passadeira de contração*, estas passadeiras destinam-se a ser instaladas imediatamente à saída da fieira e são compostas por um conjunto de rolos, cuja velocidade de rotação apresenta um valor decrescente. Este conceito, proposto por *Nijman* [51], foi denominado por *extrusão relaxada.* Segundo o autor, uma velocidade constante em toda a linha causa tensão ao piso o que implica contrações posteriores, ao longo da linha. O autor defende que quanto menor for a tensão acumulada no perfil, menor será a contração total. Assim, a primeira passadeira (*passadeira de contração*) com a configuração proposta por *Nijman* irá permitir ao perfil extrudido relaxar as tensões acumuladas a montante e evitar induzir tensões por estiramento, respeitando o comportamento natural do composto [51].

A empresa *Starret-Bytewise Measurement Systems* [50], explorou a variação dos parâmetros dimensionais do piso do pneu extrudido imediatamente após emergir da fieira e no fim da linha. Concluindo que, de uma zona para a outra, o piso sofria contrações nas dimensões: espessura e largura. Neste sentido, os autores defendem que os valores nominais do perfil inicial devem ser especificados contando com esse fator de contração. Com base neste pressuposto, foi proposta a instalação de um perfilómetro online na zona inicial, que meça o perfil obtido nessa zona e detete desvios aos valores nominais. Quando detetados desvios, a primeira passadeira de transporte é ajustada para corrigir as inconformidades. Já no final da linha deve instalar-se o segundo perfilómetro online, com a função de ajustas as especificações dimensionais do perfil no primeiro perfilómetro, caso o perfil obtido no fim da linha não cumpra as especificações [50]. Com o mesmo objetivo de estudo, na Continental Mabor, *Gonçalves* [52] investigou a correlação entre perfil quente e perfil frio. A autora verificou, a existência de contrações nas dimensões: espessura e largura dos pisos no final da linha. Assim, *Gonçalves* [52] desenvolveu uma ferramenta de cálculo em *Excel* que prevê o ajuste que se deverá fazer na fieira, quando introduzidos os perfis quente e frio obtidos nos testes de extrusão.

Temperatura

A temperatura do fundido é uma variável de processo importante no processamento de polímeros, ainda que seja de difícil medição [53,54]. A medição da temperatura do fundido fornece informações potenciais sobre as condições de fusão dentro da extrusora, isto é, homogeneidade do fluxo do fundido e a possibilidade de sobreaquecimento [46]. Idealmente, o perfil de temperaturas do fundido deve ser homogéneo e uniforme [46]. As flutuações da temperatura do fundido podem afetar a qualidade do produto e a eficiência do processo [55]. A temperatura do processo e o perfil de temperaturas são

fortemente influenciados pela velocidade do parafuso, geometria do parafuso, temperaturas do processo e tipo de material [46,55,56].

Colbert [57]. considera que existem dois tipos de oscilações de temperatura que exigem controlo. Uma flutuação de temperatura longitudinal, ou seja, ao longo do comprimento do extrudido e uma flutuação transversal, isto é, ao longo do perfil de secção do extrudido. No primeiro caso, a flutuação de temperatura deriva de parâmetros como, variações na temperatura de processo, ou seja, aquecimento e arrefecimento desregulado da temperatura da extrusora. No segundo caso, deriva de variações de temperatura transversalmente na fieira e na secção transversal dos canais de fluxo, este caso requer equipamentos de medição e controlo especiais. O autor afirma que a variação de temperatura transversal não perturbará a uniformidade do produto, desde que o fluxo seja otimizado [57]. Para uma determinada máquina e material, a otimização das configurações do processo é fundamental para obter um extrudido de alta qualidade. No entanto, foi também observado, que é difícil prever quais condições resultarão num extrudido de ótima qualidade [57].

Convencionalmente, os termopares montados no cilindro da extrusora são usados para medir a temperatura do fundido [58,59]. Essas medições são dominadas pela temperatura do cilindro da extrusora e pelo aumento da temperatura do fundido por dissipação viscosa gerada pelas taxas de deformação mais acentuadas junto à parede do canal de fluxo. Da mesma forma, devido ao lento tempo de resposta [60], os termopares não são eficazes em detetar variações rápidas na temperatura do fundido [61]. No entanto, estas medições são úteis para obter medidas aproximadas da temperatura do fundido.

Mais recentemente, vários métodos alternativos de medição de temperatura do fundido foram utilizados para monitorizar o perfil de temperaturas, nomeadamente: (i) a técnica da malha de termopares (TC) que consiste na leitura do perfil de temperaturas do material à saída da fieira através da penetração do fluxo do material [62–64]; (ii)a termometria por fluorescência que relaciona a intensidade de fluorescência de determinados materiais com a temperatura [65]; (iii) As técnicas que usam pirómetros óticos, tratando-se de sensores de temperatura que utilizam como emitida pelo corpo a medir (sensores de infravermelho) [61,65]; e por fim, (iv) a termometria por ultrassom, cujo princípio se baseia na dependência da velocidade do som no meio com a temperatura, a qual afeta o tempo de trânsito da onda ultrassónica [66]. Nestes estudos, os autores tentaram medir os perfis de temperatura do fundido em várias zonas, desde a fieira, ao longo do canal do parafuso e entre o canal do parafuso e a parede do cilindro da extrusora. Dessas técnicas, nenhuma fornece todos os meios necessários para

uso na produção. A malha TC não é robusta em condições de produção [67], a técnica de fluorescência é invasiva [65], as medições de velocidade ultrassónicas requerem uma calibração cuidadosa [66] e fornecem apenas uma medição em massa e os sensores de infravermelho podem fornecer informações de temperatura apenas no ponto específico e com penetração limitada [68].

Ademais, estratégias para a obtenção de perfis extrudidos de qualidade e com estabilidade dimensional foram desenvolvidas por *Rajkumar et al.* [69]. Os autores efetuaram um estudo sobre a distribuição do perfil de temperaturas do fundido o que permitiu determinar uma estratégia de controlo e balanceamento do fluxo de material na fieira. A estratégia consiste em usar diferentes temperaturas, nas diferentes faces da fieira alterando assim a viscosidade local do polímero fundido e, consequentemente, a distribuição do fluxo fundido [69].

Capítulo 3 - Materiais e Métodos

Este capítulo encontra-se dividido em 3 partes. Uma primeira parte, dedicada à identificação e seleção das variáveis estudadas. A segunda parte, apresenta e justifica a seleção dos materiais utilizados no estudo. Por último, a terceira parte descreve de forma pormenorizada, os 3 testes e respetivas metodologias/procedimentos adotados no decorrer dos trabalhos, para o estudo e análise das 3 variáveis selecionadas para o estudo.

3.1. Identificação e seleção de variáveis

Para identificar e selecionar as variáveis de interesse, recorreu-se a um diagrama causa-efeito. Este, permite agrupar e visualizar várias causas que são consideradas como a possível origem de um problema/fenómeno.

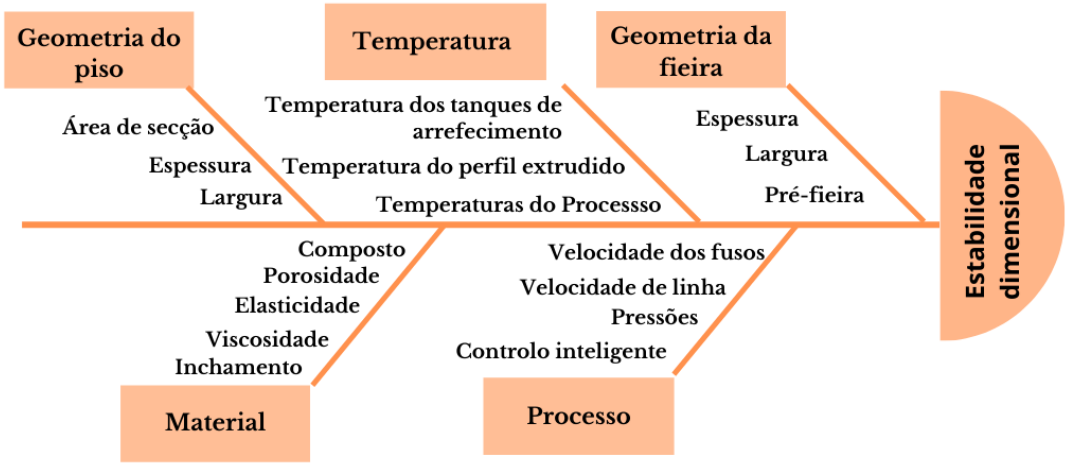


Figura 24- Diagrama causa-efeito de estabilidade dimensional

Como ilustrado na Figura 24 o problema em discussão, é a estabilidade dimensional dos artigos extrudidos, em concreto da largura inicial dos pisos. Considerando as muitas variáveis que podem influenciar a estabilidade dimensional do produto em estudo, agrupou-se um conjunto de possíveis causas, das quais a geometria do piso, a temperatura, geometria da fieira, as propriedades do material e as variáveis do processo. Com base na sensibilidade e experiência dos intervenientes por parte da Continental, nos conhecimentos científicos e práticos obtidos pela autora com a pesquisa bibliográfica e, considerando a limitação temporal para a realização deste estudo, foram selecionadas 3 variáveis, que se afiguraram dominantes no problema em análise.

O propósito associado à seleção das três variáveis segue descrito e justificado.

A. Reologia do composto

A variável reologia do composto foi selecionada, como possível causa do problema, pois a mesma afeta o fluxo na cabeça de co-extrusão. Sabendo que no processo de extrusão as condições de processamento não são constantes, considerou-se necessário aferir a sensibilidade da reologia dos materiais às variáveis do processo (temperatura, taxa de deformação, etc.).

B. Temperatura do perfil extrudido à saída da fieira

A avaliação desta variável teve como intuito investigar a suspeita de que, devido ao histórico do material na extrusora, o perfil de temperatura do extrudido à saída da fieira não apresenta uma distribuição uniforme e estável ao longo do processo, além de que afeta a reologia do composto e por sua vez o fluxo, o que poderia causar problemas de instabilidade. Isto em conformidade com alguns estudos efetuados na literatura [46,55,56].

C. Controlo do processo

O estudo desta variável surge com o intuito de diagnosticar o atual algoritmo de controlo de processo. Isto porque suspeita-se que a metodologia de controlo da co-extrusão existente (RMEA, descrita na Secção 1.2.7) não efetua um controlo adequado da largura dos pisos. Esta suspeita surge da sensibilidade dos técnicos envolvidos no projeto e da revisão realizada da literatura onde foi possível verificar estratégias de controlo inteligente com maior precisão de controlo da largura de perfis extrudidos [22,49,50].

3.2. Materiais

A receita de um composto de borracha integra um conjunto de matérias-primas e as respetivas quantidades, como descrito na Secção 1.2.3. A receita de cada composto utilizado no estudo, não pode ser divulgada por questões de confidencialidade, contudo podem ser indicados os códigos/nomes dos compostos para efeitos de enumeração. Os testes realizados ao longo deste projeto utilizaram diferentes compostos de piso de pneu, os quais estão descritos abaixo.

Materiais: Teste A e C

O piso selecionado para o estudo levado a cabo nos Teste A e C, é um piso de produção crítica em termos de estabilidade dimensional.

Tabela 3-Materiais utilizados nos Testes A e C

Composto	Região do Piso
T14030	Capa
T01139	Base
S08156	Wing-tip

Os compostos descritos na Tabela 3 foram os utilizados, pois são os materiais associados ao piso selecionado para ambos os testes (A e C). De notar que os materiais associados ao piso em estudo no Teste A, foram recolhidos para realizar a caraterização reológica, como será descrito adiante nos métodos. Apenas foram recolhidos e caraterizados os compostos T14030 e T01139. O composto S08156, não foi recolhido e não integra o estudo, uma vez que representa uma percentagem ínfima (3,66%) da área total do piso, e é um material de difícil recolha, dada a pequena dimensão dos canais de escoamento deste material no processo de co-extrusão.

Materiais: Teste B

No Teste B acompanharam-se várias produções distintas de pisos e, os materiais associados são igualmente distintos.

Tabela 4- Materiais utilizados no Teste B

Código de Produção (Piso)	Composto (Região do Piso)		
	Capa	Base	Wing-tip
1974	T05129	T01139	S08156
320	T13014		
396	T14030		
655	T00509		
588	T02107		
972	T14030		

Como é possível observar na Tabela 4, os pisos são constituídos na maioria dos casos por 3 compostos de borracha – "Capa", "Base" e "Wing-tip", a distinção dos materiais centra-se apenas no composto "Capa", visto que tanto o composto "Base" como o "Wing-tip" são sempre os mesmos na linha de produção em que se realizaram os testes.

3.3. Métodos

3.3.1.Teste A

Como descrito acima, a variável em estudo neste teste é a reologia do composto dada a necessidade que surgiu de aferir a sensibilidade da reologia dos materiais às variáveis do processo.

Procedimento experimental

A metodologia adotada no Teste A consistiu em recolher amostras dos compostos de Capa e Base que constituem o piso selecionado (piso 806), antes e após a extrusão, para posteriormente realizar a caraterização reológica. Este teste contou com acompanhamento de 5 produções, em dias distintos. A metodologia de recolha de amostras (Antes e Após) segue detalhadamente ilustrada Figura 25.

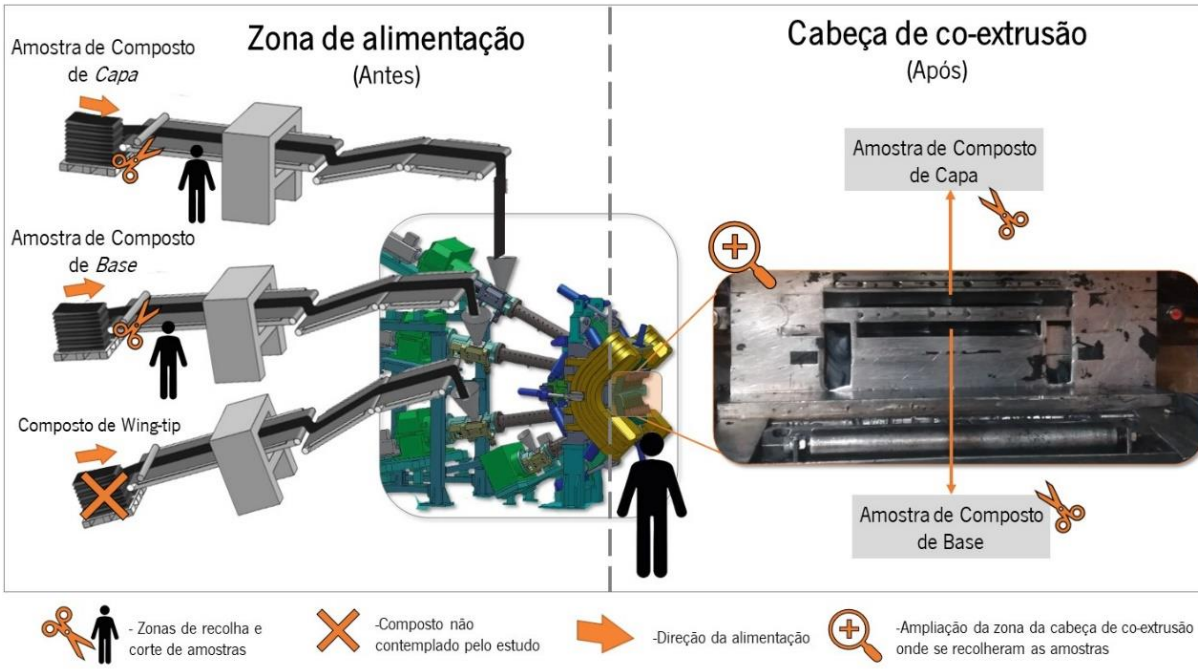


Figura 25- Esquema da metodologia adotada na recolha de amostras de matéria prima.

Como está ilustrado na figura as amostras da matéria-prima foram recolhidas em dois momentos. No primeiro momento, antes da plasticização da borracha, isto é, na zona de alimentação antes de entrar na extrusora. A zona de alimentação é composta por três rampas que alimentam os compostos de borracha às extrusoras, neste caso, como apenas se cortaram amostras do composto de Capa e Base, a recolha foi realizada apenas nas rampas de alimentação dos respetivos compostos. No segundo momento após a conformação, ou seja, à saída da cabeça de co-extrusão. A cabeça de co-extrusão é constituída por 3 canais, os canais correspondentes aos compostos recolhidos estão sinalizados na figura com as setas que indicam a zona do composto de Capa (em cima) e de Base (em baixo).

As condições de processamento utilizadas nesta metodologia seguem detalhadas na Tabela 5.

Tabela 5-Condições de extrusão utilizadas na recolha de amostras

Linha de co-extrusão	Velocidade de linha	Velocidade de rotação do parafuso(rpm)		
		Capa(Ø200)	Base (Ø150)	Wing-tip(Ø90)
	(m/min)	(rpm)	(rpm)	(rpm)
E04	35	24	10	19

Como é possível verificar pela Tabela 5, a metodologia de recolha de amostras da matéria prima foi realizada sempre com as mesmas condições de processamento e na linha de co-extrusão E04 (descrita no Capítulo 1- Secção 1.2.5.).

Preparação de amostras

Uma vez recolhidas as amostras de matéria-prima, estas seguiram para o laboratório de reologia da empresa, para serem preparadas e caracterizadas reologicamente. No laboratório, cada amostra é preparada para cada tipo de teste a analisar. Adiante serão descritos os ensaios realizados. Para ambos os testes realizados, a preparação de amostras utiliza uma cortante automático que confere às amostras uma forma de disco (ver Figura 26) com um volume entre 4,0 a 6,0 cm^3, respeitando as normas de ambos os aparelhos.



Figura 26- Forma das amostras cortadas a partir da matéria prima recolhida.

Para cada matéria-prima recolhida nos momentos antes e após, foram preparadas 5 amostras para cada ensaio a realizar no RPA e 10 amostras para o ensaio a realizar no viscosímetro de Mooney, uma vez que o viscosímetro de Mooney requer 2 amostras para cada teste, como será descrito adiante na descrição do aparelho.

Métodos de caracterização reológica

Equipamento- Viscosímetro de Mooney

O viscosímetro de Mooney é um dos aparelhos de caraterização reológica mais comuns para medir a viscosidade da borracha não-vulcanizada [70,71]



Figura 27- MV2000 ALPHATECHNOLOGIE

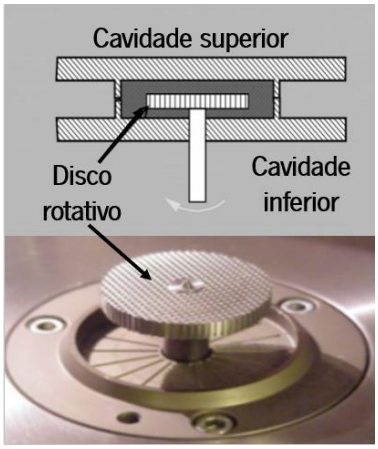


Figura 28-Cavidade de teste do MV2000

O aparelho utilizado na presente dissertação foi o viscosímetro de Mooney MV2000 da Alpha Technologies [72].

Como é possível observar através da Figura 27 e da Figura 28, este aparelho é constituído por um disco de metal rotativo que gira a uma velocidade de 2 rotações por minuto e opera a uma temperatura constante (100 °C) por um tempo específico [70,73]. Dada a velocidade constante, o disco rotativo experimenta uma determinada resistência à rotação que é registada como binário em Nm. Um binário de 0,083 Nm é equivalente a uma unidade Mooney [70].O viscosímetro de Mooney converte automaticamente o valor do binário medido e retribui a medição em unidades de Mooney. Geralmente, apresentada da seguinte forma:

$$x - ML\ 1 + 3\ (T\ °C\ ) \quad (1)$$

Onde " x " representa a unidade arbitrária de viscosidade de Mooney relatada pelo aparelho, M indica Mooney, L assinala o uso do disco maior (S indicaria o disco menor), 1 é o tempo em minutos de pré-aquecimento, 3 corresponde ao tempo de ensaio (em minutos) e T °C é a temperatura a que o ensaio foi realizado.

As condições em que os ensaios de viscosidade de Mooney foram realizados estão descritos em detalhe na Tabela 6.

Tabela 6-Condições do ensaio de viscosidade de Mooney

Etapa 1	**Pré-aquecimento**	
Tempo	1	Min
Temperatura	100	°C
Etapa 2	**Teste**	
Tempo	3	Min
Temperatura	100	°C
Rotação	2	Rpm

Perante estas condições de ensaio as curvas de viscosidade de Mooney são geralmente apresentadas como segue ilustrado na Figura 29. Em que, no eixo das abcissas vem o tempo do ensaio em minutos e , no eixo das ordenadas, o valor do binário medido retribuído como viscosidade de Mooney em unidades de Mooney (MU).

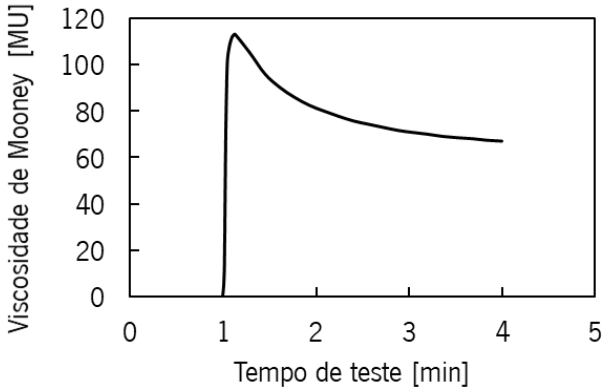


Figura 29–Curva típica da viscosidade de Mooney (Adaptado de [71]).

Pela análise das curvas de Mooney, torna-se possível quantificar as diferentes viscosidades dos compostos recolhidos nos dois momentos do processo de co-extrusão, de acordo com a metodologia estabelecida (Antes e Após). O valor relatado da viscosidade de Mooney é o valor mais baixo registado nos últimos 30 segundos do teste. Isto é definido devido à natureza tixotrópica da borracha (que se manifesta por uma variação da viscosidade com o tempo) [71]. Como é possível observar pela Figura 29, a viscosidade medida com o ensaio de viscosidade de Mooney, geralmente diminui com o tempo.

Uma vez que a viscosidade de Mooney é apenas uma unidade arbitrária, este teste não fornece informações suficientes para diferenciar claramente as propriedades reológicas do material. O RPA (Rubber Process Analyzer) pode ser facilmente usado como uma ferramenta de avaliação das propriedades reológicas como uma alternativa aos testes tradicionais do viscosímetro Mooney [74].

Equipamento- RPA

O RPA (Rubber Process Analyzer), é um aparelho de teste reológico mecânico dinâmico (DMRT) regularmente utilizado na industria para medir as propriedades viscoelásticas de polímeros e compostos de borracha [75].



Figura 30- RPA 2000 ALPHA TECHNOLOGIES (Adaptado de [76]).



Figura 31-Cavidade de teste RPA2000**.**

O aparelho utilizado na presente dissertação foi o RPA2000 da ALPHA TECHNOLOGIES (ver Figura 30). Este equipamento é constituído por uma câmara de teste pressurizada e selada, em que é colocada uma amostra em forma de disco, como se pode observar pela Figura 31 e pela Figura 32. Para manter constante ao longo do raio a tensão de corte e evitar escorregamento, a cavidade da amostra é composta por dois pratos bicónicos que possuem diversas ranhuras, como ilustrado na Figura 32. O bloco inferior que oscila entre ± 0,05 a ± 90°, correspondendo, respetivamente, a uma deformação de ± 0,28 a ± 1256 %. No que diz respeito à frequência de oscilação, o RPA opera numa gama de 0,0016 a 33,33 Hz [77].

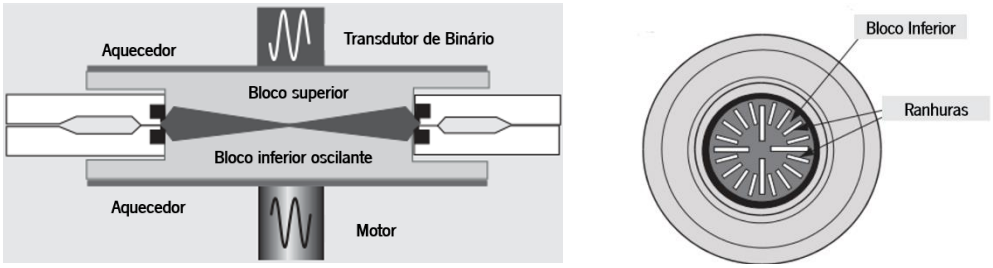


Figura 32 - Cavidade do teste de RPA (Adaptado de [78]).

Se nas condições do ensaio for possível assumir comportamento viscoelástico, uma deformação sinusoidal aplicada produz uma resposta de binários também sinusoidal. Este binário é denominado por binário complexo (S*) e não se encontra em fase com a deformação devido à natureza viscoelástica da borracha. Ao aplicar a transformada de Fourier ao sinal do S*, consegue-se calcular a componente elástica do binário S' (em fase com a deformação) e a componente viscosa S'' (desfasada 90º da deformação). Uma vez obtidos os valores de binário é possível converter para os módulos elástico (G'), viscoso (G'') e determinar a medida que relaciona ambos os módulos ($\tan\delta$) através das seguintes equações [79,80].

$$G' = \frac{S^*}{B\gamma}\cos(\delta) \quad \textbf{(2)}$$

$$G'' = \frac{S^*}{B\gamma}\text{sen}(\delta) \quad \textbf{(3)}$$

$$B = \frac{2\pi R^3}{3\alpha} \quad \textbf{(4)}$$

$$\tan\delta = \frac{G''}{G'} \quad \textbf{(5)}$$

O B corresponde ao fator de forma da cavidade de teste, dado pela Equação (3), onde R é o raio do prato (20,626 mm), α ao ângulo entre os dois blocos bicónicos (0,125 radianos), γ a deformação aplicada e δ o ângulo de desfasamento ou atraso [79,80].

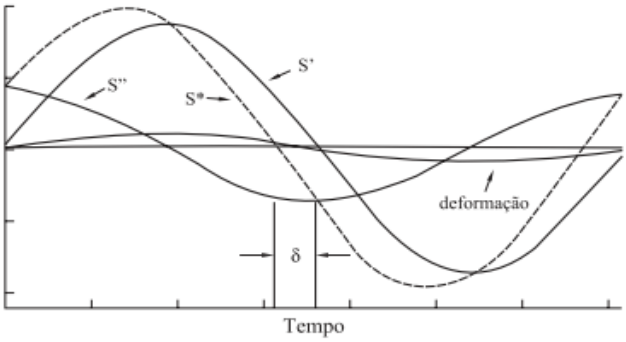


Figura 33 - Resposta de binário dado uma deformação sinusoidal(Adaptado de [78]).

O software do RPA fornece os módulos elástico (G') e viscoso (G'') automaticamente [76]. A fim de aferir a sensibilidade da reologia dos materiais às variáveis do processo e avaliar as propriedades viscoelásticas e a morfologia do material antes e após o processamento, deve realizar-se um varrimento em frequência. O varrimento em frequência deve ser realizado com uma deformação fixa correspondente à deformação da região linear do material. Para tal, um varrimento em deformação deve anteceder sempre o varrimento em frequência para que se identifique/determine a região viscoelástica linear do material testado. A região viscoelástica linear indica a gama de deformação na qual o varrimento em frequência pode ser realizado sem destruir a estrutura da amostra[81].

Varrimento em amplitude de deformação

No ensaio de varrimento em amplitude de deformação, a frequência e a temperatura permanecem constantes, enquanto a amplitude da deformação varia de forma pré-programada. Após selecionar a temperatura do teste, é necessário encontrar a zona de viscoelasticidade linear dos compostos em estudo, e selecionar uma amplitude nessa gama à qual se irão realizar os testes de varrimento em frequência [82,83].

Este teste está dividido em quatro fases: duas relaxações intercaladas por dois varrimentos em amplitudes, um de condicionamento e outro de medição[71]. Este método permite à amostra relaxar as tensões internas, devido à mistura, assegurando um bom fluxo na cavidade pressurizada [84]..As condições das várias etapas seguem sintetizadas na Tabela 7.

Tabela 7- Etapas e condições do teste de varrimento em amplitude de formação.

Etapa 1	**Pré-aquecimento**	
Tempo	1	min
Temperatura	70	°C
Etapa 2	**Condicionamento**	
Tempo	9	Min
Temperatura	70	°C
Frequência	1	Hz
Deformação	0.28 – 100	%
Etapa 3	**Relaxamento**	
Tempo	1	min
Temperatura	70	°C
Etapa 4	**Varrimento de Deformação**	
Tempo	9	min
Temperatura	70	°C
Frequência	1	Hz
Deformação	0.28 – 100	%
Duração	**20**	**min**

Os resultados das medições realizadas em varrimentos em deformação geralmente apresentam, no eixo das abcissas, a amplitude de deformação em % e , no eixo das ordenadas, o módulo elástico (G') e viscoso (G'') em kPa. Ambos os eixos são apresentados em escala logarítmica (consultar Figura 34) [84–86].

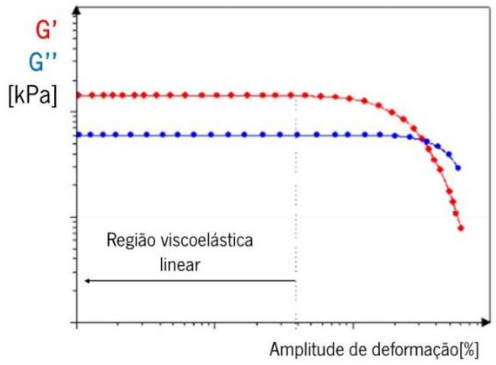


Figura 34- Curvas típicas de um varrimento em deformação (Adaptado de [85]).

Como é possível verificar pela Figura 34, a região de viscoelástica linear é a região em que a estrutura interna do material se mantém inalterada, observando-se que, *G' e G''* se mantêm constantes à medida que se aumenta a amplitude de deformação. A determinação desta zona é o principal objetivo da realização deste tipo de varrimentos.

Varrimento em frequência

Como mencionado acima, através do ensaio de varrimento em frequência é possível estudar a o comportamento reológico do material ao longo do tempo para uma deformação não destrutiva (encontrada com o varrimento em amplitude). O teste inicia-se com valores de frequência mais baixos e vai aumentando ao longo do teste. Nas frequências mais baixas estuda-se o material quando sujeito a movimentos lentos num longo intervalo de tempo [80,83,87]. Após definir a temperatura e tempo que garantem a estabilidade da amostra, assim como uma amplitude de deformação na zona de viscoelasticidade linear, é possível realizar o teste de varrimento em frequência[71]. A estrutura do teste está resumida na Tabela 8.

Tabela 8- Etapas e condições do teste de varrimento em frequência

Etapa 1	**Pré-aquecimento**	
Tempo	5	min
Temperatura	70	°C
Etapa 2	**Varrimento em frequência**	
Temperatura	70	°C
Frequência	0,01 a 15	Hz
Deformação	**	%
Duração	**25**	**min**

** A definir após a determinação da região linear

As medições realizadas nos varrimentos em frequência geralmente apresentam, no eixo das abcissas, a frequência em Hz e , no eixo das ordenadas, o módulo elástico (G') e viscoso (G'') em kPa. Ambos os eixos são apresentados em escala logarítmica (consultar Figura 35).

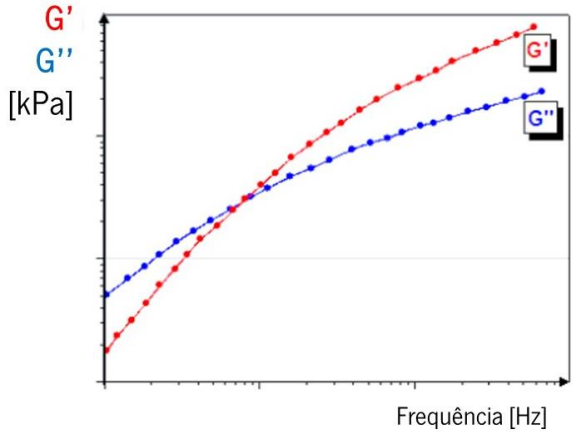


Figura 35- Curvas típicas de um varrimento em frequência (Adaptado de [88]).

Através deste teste é possível entender qual o comportamento reológico do material dependendo dos valores de frequência aplicados. Como é possível verificar pela Figura 35, quando os materiais modificam o seu comportamento existe um ponto onde o módulo viscoso, G'', e o módulo elástico, G', se cruzam a um dado valor de frequência. Quanto maior for o valor de frequência nesse cruzamento, maior será a massa molecular do composto em análise [81,83,89]. A resposta a baixas frequências é particularmente útil para prever o comportamento do fluxo dos materiais em processos com baixas taxas de corte, como o processo de extrusão [89,90].

3.3.2.Teste B

Como descrito na seleção e identificação das variáveis, a variável em estudo no teste B é o perfil de temperatura da superfície do extrudido à saída da fieira. Para avaliar esta variável acompanhou-se a produção dos pisos que seguem enunciados na Tabela 9.

Tabela 9-Códigos associados aos pisos selecionados para o estudo.

Código de Produção (Piso)	**Acompanhamentos**
1974	2
320	2
396	3
655	3
588	2
972	2

O critério de seleção destes pisos, apresentados na Tabela 9 ,foi criar um gama de registos que abrangesse desde pisos sem registo de problemas em termos de estabilidade dimensional até a pisos conhecidos como problemáticos na questão da estabilidade dimensional (por largura).

Procedimento experimental na linha de co-extrusão

O procedimento experimental adotado durante os acompanhamentos realizados para avaliar o perfil de temperatura do extrudido à saída da fieira, segue ilustrado na Figura 36.

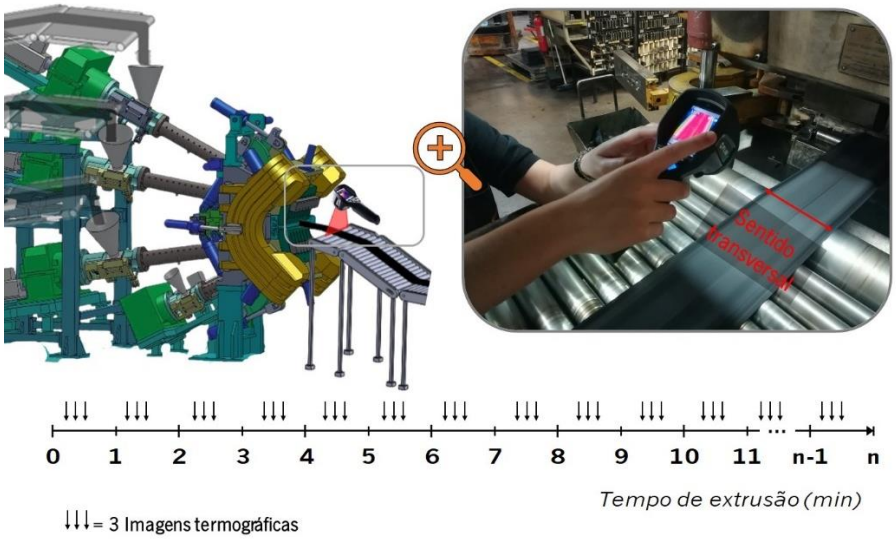


Figura 36- Esquema ilustrativo do procedimento de avaliação do perfil de temperatura do extrudido.

Como é possível verificar pela Figura 36, com recurso à técnica de termografia por infravermelhos, realizou-se um conjunto de medições do perfil de temperatura do extrudido à saída da fieira. No decorrer de todo o tempo de produção, a cada minuto, recolheram-se 3 leituras de temperatura do perfil do extrudido. A câmara utilizada no estudo foi a FLIR i7.

Procedimento de análise dos termogramas: FLIR Tools

Através dos termogramas capturados à saída da fieira (ver Figura 37), procedeu-se à análise e tratamento destes com recurso ao software "FLIR Tools Thermal Analysis and Reporting"[91]. Este software permite o tratamento das imagens e a exportação dos valores de temperatura para MS Excel, através da funcionalidade "Traçar linha", a qual cobriu a largura do piso (ver Figura 37). Assim obtiveram-se os valores de temperatura registados nessa linha, possibilitando a obtenção do perfil de temperatura em toda a largura do piso à saída da fieira para cada captura/momento (ver Figura 38).

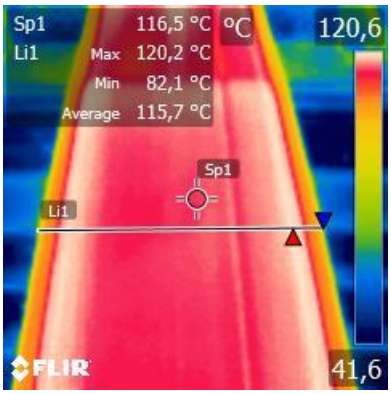


Figura 37- Imagem termográfica captura com a câmara FLIR i7

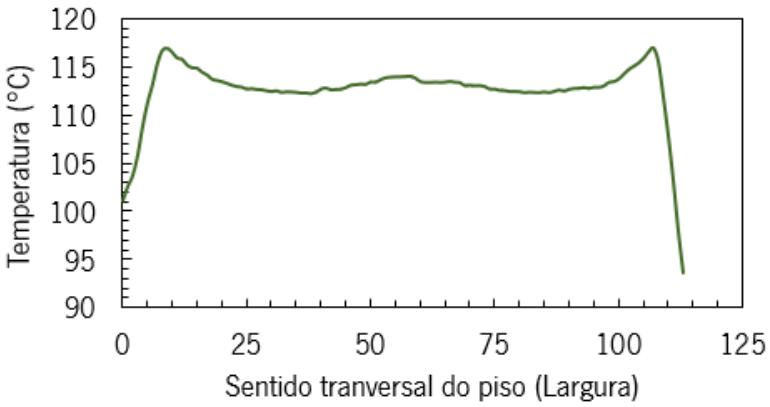


Figura 38- Exemplo de perfil de temperatura obtido com a função linha.

A Figura 37 ilustra a funcionalidade utilizada com recurso ao software *FLIR Tools* para o tratamento das imagens e a Figura 38 ilustra o tipo de perfil de temperaturas que se obtém após a exportação dos valores de temperatura.

Procedimento de análise dos termogramas: MS Excel

Uma vez exportados todos perfis de temperatura obtidos durante uma produção inteira, estes agruparam-se num gráfico que apresenta, no eixo das abcissas, os pontos da largura do perfil que a linha cobriu e, no eixo das ordenadas, a temperatura de cada ponto do perfil em °C (ver Figura 39).

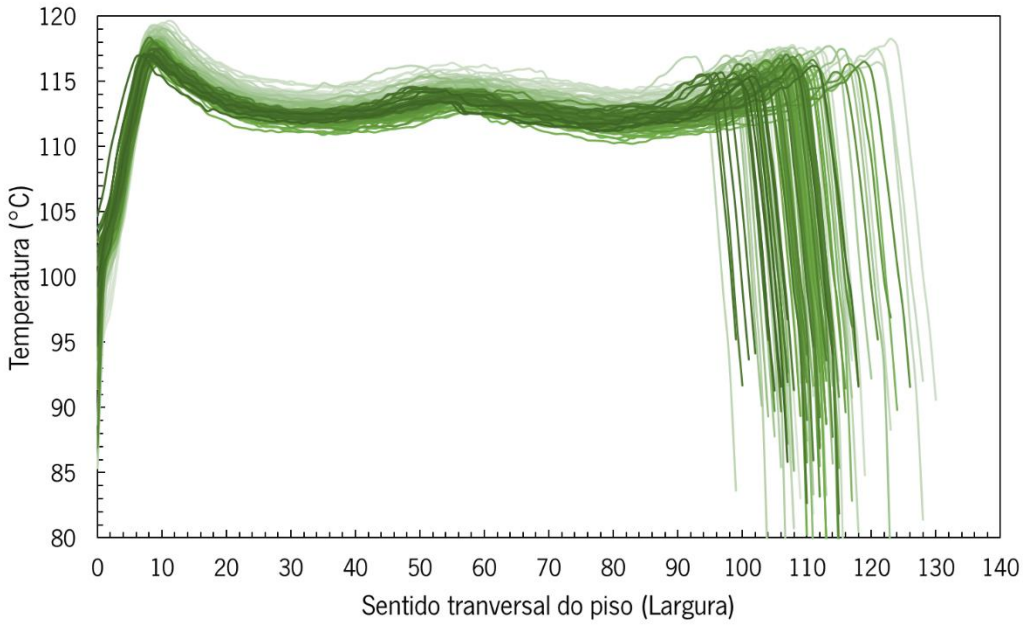


Figura 39- Junção de todos os perfis de temperatura obtidos no total de uma corrida de extrusão

Como é possível verificar pela Figura 39, a linha traçada que cobre a largura dos perfis, obtidos durante todo o tempo de co-extrusão, nem sempre compreende à mesma largura, muitas vezes devido às oscilações de largura do perfil durante o processo ou até mesmo a imprecisões de medição e posicionamento da câmara. Isto dificulta o cálculo médio dos 3 perfis obtidos no intervalo de cada minuto e não permite uma comparação fiável entre os perfis de temperatura ao longo do tempo. Assim, surgiu a necessidade de ajustar todos os perfis para que estes se sobrepusessem nos mesmos pontos em termos de largura. Para tal, realizaram-se interpolações aos perfis obtidos para obter todos os pontos sempre no mesmo local. Por definição, uma interpolação é um método que permite realizar um ajuste de uma curva (função) quando conhecemos um conjunto de pontos.

Posteriormente à realização da interpolação de todos os perfis de temperatura obtidos, determinaram-se os perfis médios de temperaturas para cada minuto. Estes resultam do cálculo do valor médio dos 3 perfis obtidos no intervalo de cada minuto. Estes agruparam-se num gráfico que apresenta no eixo das ordenadas a temperatura ao longo do perfil em °C e, no eixo das abcissas, a largura normalizada dos perfis obtidos (ver Figura 40).

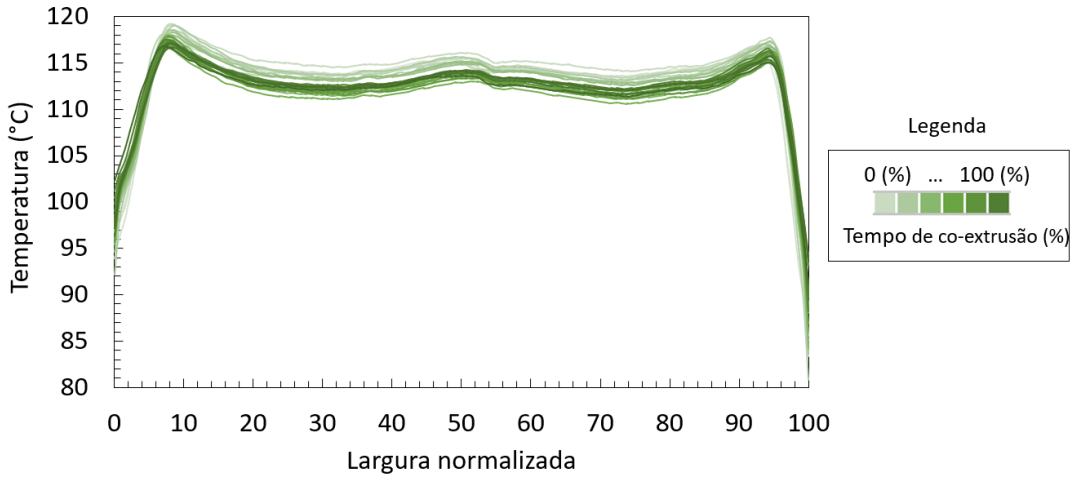


Figura 40- Perfis de temperatura obtidos após interpolação.

Para cada perfil médio (ver Figura 40), correspondente a um minuto de medição, foi calculada a temperatura média de todo o perfil. ($\bar{T}_{i\%}$), de forma a tornar mais intuitiva a compreensão da evolução da temperatura do perfil com o tempo de co-extrusão.

Assim, a evolução da temperatura média do perfil com o tempo de co-extrusão será ilustrada num gráfico em que o eixo das abcissas apresenta o tempo de co-extrusão em percentagem e o eixo das ordenadas a temperatura média de todo o perfil ($\bar{T}_{i\%}$), (ver Figura 41).

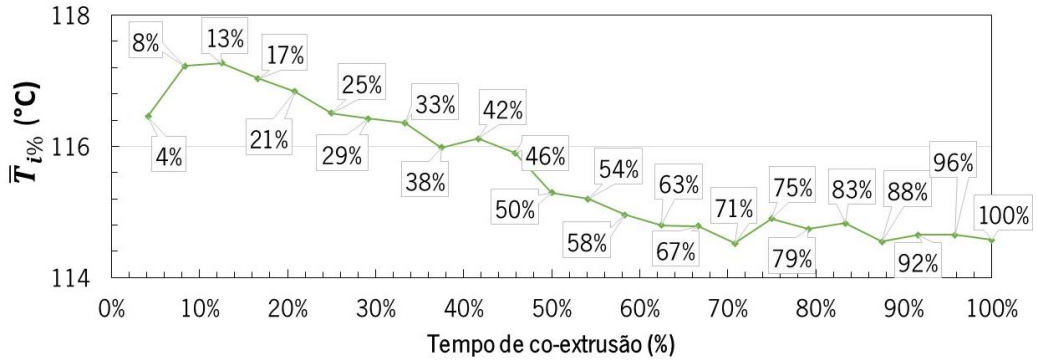


Figura 41- Evolução da temperatura média dos perfis com o tempo de co-extrusão**.**

Como é possível verificar pela Figura 41, cada ponto corresponde à temperatura média de todo o perfil ($\bar{T}_{i\%}$) calculada para cada minuto, neste caso, o tempo é apresentando em percentagem e não em minutos para que seja possível comparar todas as co-extrusões acompanhadas, uma vez que nem todos os pisos correspondem ao mesmo tempo de produção. A Figura 41 ilustra a evolução da temperatura média do perfil com o tempo de produção, apenas para um dos processos acompanhados. Posteriormente, na análise de resultados, os restantes pisos acompanhados no estudo serão todos

agrupados neste gráfico com o objetivo de compreender em que momento do processo é alcançado um regime estacionário.

Uma vez encontrado um regime estacionário do processo, determina-se a temperatura estável ($T_{estável}$). Esta corresponde à média de temperaturas compreendidas neste período e é dada pela seguinte equação:

$$T_{estável} = \frac{\sum_i^N \bar{T}_{i\%}}{N} \quad \textbf{(6)}$$

Em que i corresponde aos vários instantes de tempo compreendidos no intervalo do regime estacionário, $\bar{T}_{i\%}$ é a temperatura média do perfil nos respetivos instantes i e N corresponde ao número de medições realizadas no intervalo de tempo do regime estacionário.

Posto isto, calculou-se o desvio entre cada $\bar{T}_{i\%}$ e a $T_{estável}$, dado por:

$$Desvio_{i\%} = \bar{T}_{i\%} - T_{estável} \quad \textbf{(7)}$$

Calculados os desvios, procedeu-se ao cálculo do desvio médio absoluto à estabilidade para cada artigo produzido. O desvio médio absoluto (DAM) é dado pela seguinte equação.

$$DAM = \left| \frac{\sum Desvio_{i\%}}{N_{Total}} \right| \quad \textbf{(8)}$$

Onde N_{Total} representa o número total de medições realizadas durante todo o tempo do processo.

Paralelamente, e com o intuito de averiguar se existe alguma correlação entre o desvio médio absoluto da temperatura e a largura inicial obtida, foram levantados os dados registados em linha da largura inicial. Como foi detalhadamente descrito na Secção 1.2.7, a primeira estação de controlo da linha de co-extrusão conta com uma câmara de verificação de largura que está ligada ao sistema de controlo inteligente do processo (RMEA). Este sistema, regista na própria base de dados a largura inicial verificada pela primeira estação de controlo a cada segundo, sendo possível aceder e exportar posteriormente esses dados. Com recurso a esta base de dados, é possível verificar e quantificar a largura inicial do piso co-extrudido, no decorrer de todo o tempo de co-extrusão.

Uma vez realizado o levantamento de dados das co-extrusões acompanhadas, calcula-se o erro associado à largura inicial. Este erro é dado pela razão entre a largura inicial lida e a largura inicial nominal. Esta razão é apresentada pela seguinte equação:

$$Erro\ largura\ inicial = \frac{Li}{L\ Nominal} \quad \textbf{(9)}$$

Assim, os erros associados à largura inicial, em função do tempo de co-extrusão, de todas as produções acompanhadas neste estudo, serão apresentados como ilustra a Figura 42, em que o erro associado à largura inicial obtida é representado no eixo das ordenadas e o tempo de co-extrusão normalizado em percentagem é representado no eixo das abcissas.

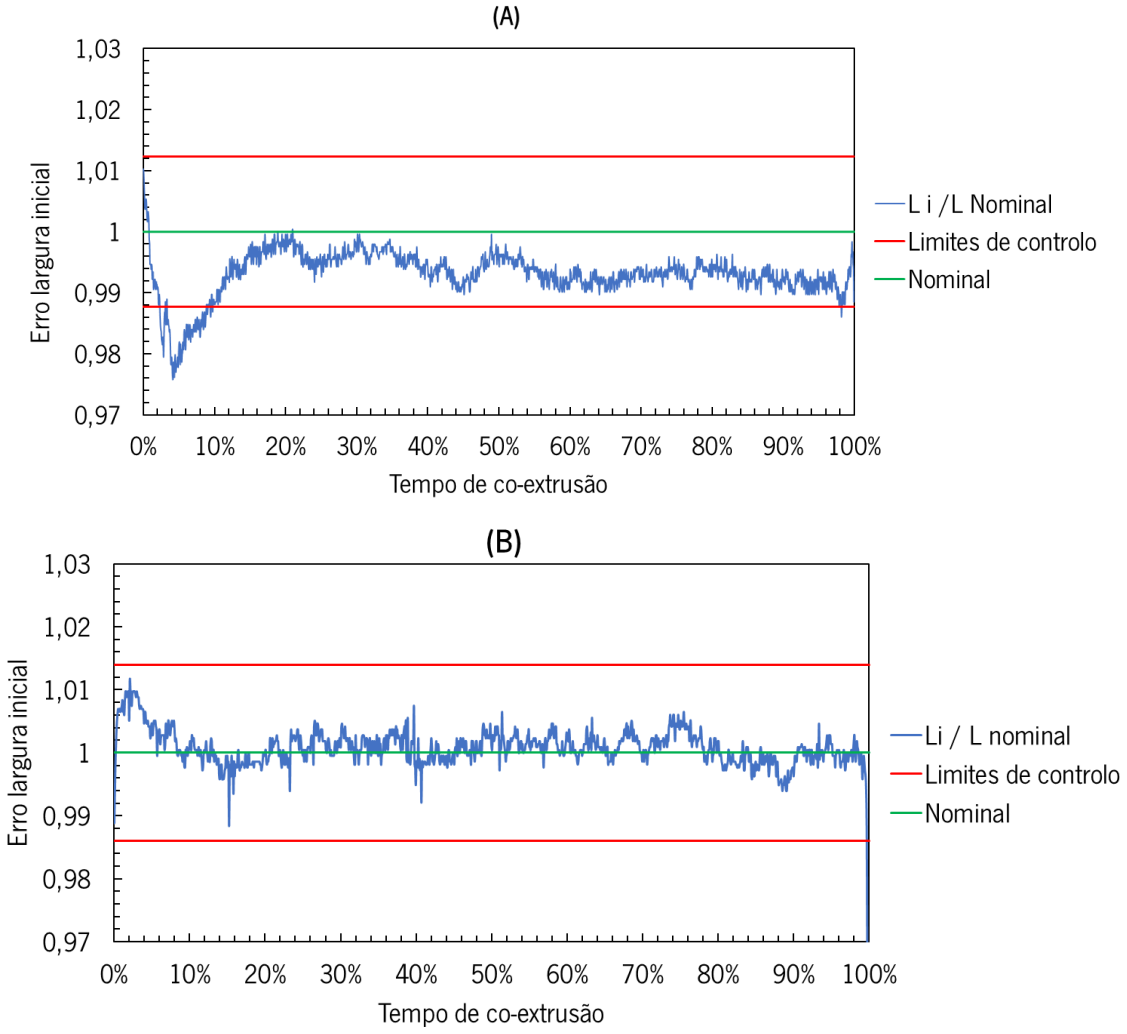


Figura 42- Erro associado à largura inicial em função do tempo de co-extrusão; **(A)** Largura parcialmente não conforme; **(B)** Largura conforme.

A Figura 42 (A) ilustra os casos em que o erro associado à largura é inferior, aos limites de controlo do processo, durante um período.do tempo de co-extrusão Nestes casos, denominamos a largura inicial do piso como parcialmente não conforme (PNC). Já na Figura 42 (B) verifica-se o comportamento típicoo qual denominamos largura inicial conforme (C), isto é, o erro associado à largura inicial encontra-se dentro dos limites de controlo do processo, durante todo o tempo de co-extrusão. Estas

denominações "PNC" e "C" serão utilizadas na análise de resultados para descrever o tipo de erro associado à largura inicial verificado em cada processo acompanhado no estudo.

As condições de co-extrusão, nomeadamente a velocidade de linha, das produções acompanhadas e respetivas nomenclaturas dos pisos produzidos para a avaliação do perfil de temperatura segue detalhadamente descrito na Tabela 10.

Tabela 10-Condições de co-extrusão dos artigos acompanhados na avaliação do perfil de temperatura do extrudido.

Linha de co-extrusão	Código de Produção (Piso)	Velocidade de linha (m/min)
E04	1974	35
	320	35,5
	396	38,8
	655	35
	588	35
	972	36

Os processos acompanhados, como apresentado na Tabela 10 , foram todos realizados na mesma co-extrusora, na E04, descrita no Capítulo 1- Secção 1.2.5. Cada código de produção está associado a um piso diferente, logo as condições de co-extrusão, em concreto a velocidade de linha, de cada código de produção são igualmente distintas.

3.3.3.Teste C

A variável em estudo no Teste C, como identificado acima, é o controlo do processo. Este controlo, foi referido e descrito na Secção 1.2.7. O algoritmo pré-programado do sistema RMEA oferece um controlo que foi implementado para prevenir variações indesejadas nas variáveis a controlar (largura inicial e massa linear). Assim, a avaliação da eficiência deste controlo, surge como propósito de estudo do Teste C. Contudo, o principal foco deste teste é o controlo da variável largura inicial.

Procedimento experimental

Para proceder à avaliação idealizada, o procedimento experimental adotado neste teste consistiu em acompanhar em linha a produção de um artigo de produção específico. O artigo de produção (piso) selecionado para os acompanhamentos foi o piso de código 806, pelas mesmas razões que foi selecionado para o Teste A. Ou seja, por ser conhecido como um artigo de produção problemática quanto à obtenção da largura inicial nominal.

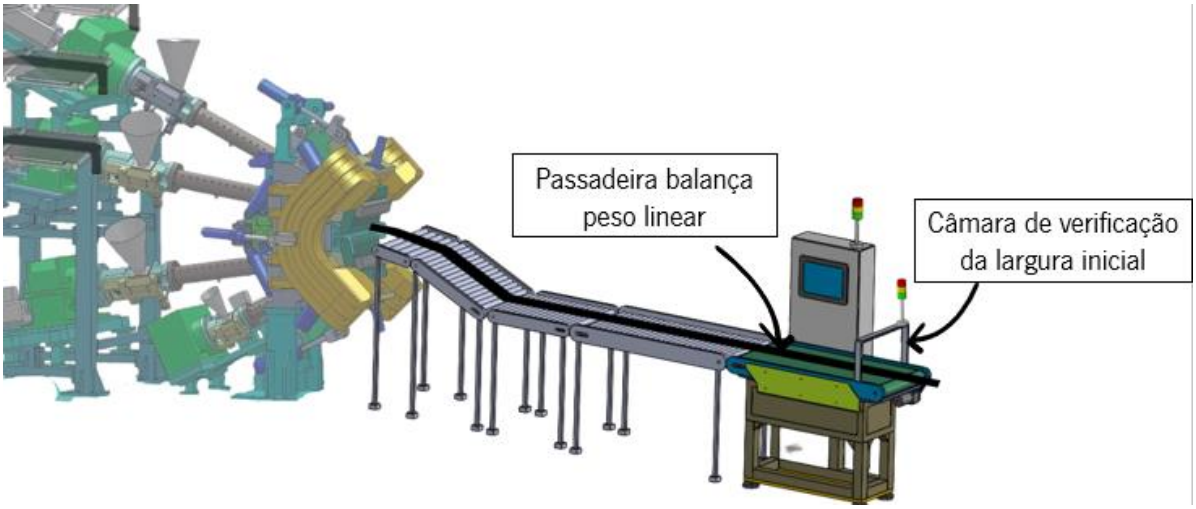


Figura 43- Estação de controlo inicial e respetivos equipamentos associados.

Como é possível observar na Figura 43, a estação de controlo inicial da linha de co-extrusão é dotada de uma câmara de leitura/verificação da largura inicial do piso e de uma passadeira que mede a massa linear do piso, a cada segundo, no decorrer de todo o tempo de extrusão. Após acompanhar em linha diversas produções do piso de código 806 selecionado para o estudo, recolheram-se os dados registados pelo sistema na base de dados.

Os resultados obtidos com a estratégia adotada serão ilustrados em gráficos em que no eixo primário das ordenadas se apresenta o erro associado á largura inicial, no eixo secundário das ordenadas a velocidade de linha em metros por minuto (m/min) e no eixo das abcissas o tempo de co-extrusão em percentagem (%), como ilustrado na Figura 44.

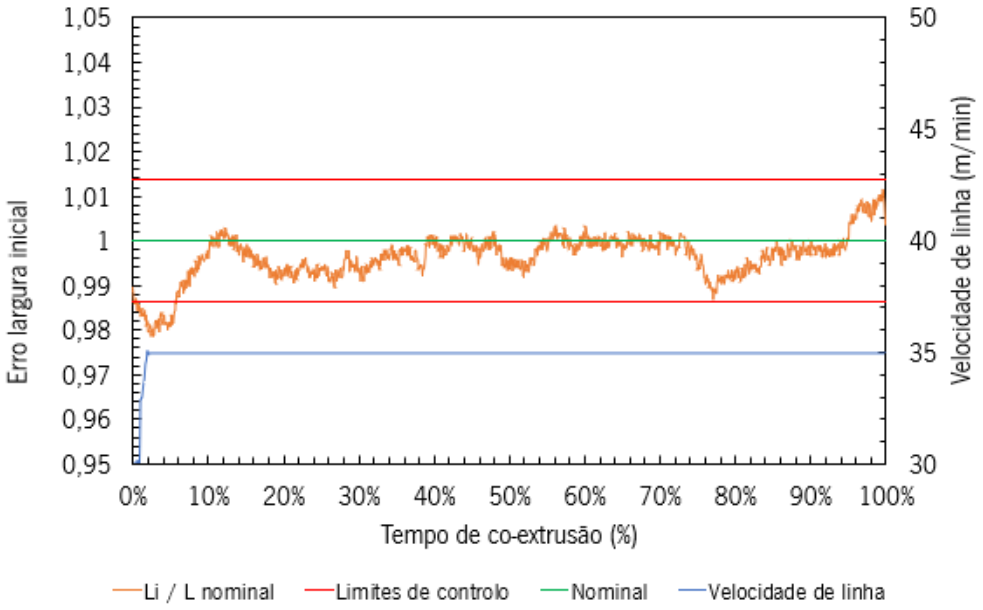


Figura 44-Exemplo da construção de gráficos representativos do erro associado à largura inicial com a evolução da velocidade de linha como variável de controlo.

Tabela 11- Condições de extrusão do piso de código 806

Linha de co-extrusão	**Velocidade de linha (m/min)**
E04	35

A Tabela 11 apresenta os parâmetros de co-extrusão do artigo acompanhado, sendo que foram acompanhadas 8 produções do artigo em estudo, cuja produção decorreu sempre na linha de co-extrusão E04, descrita no Capítulo 1- Secção 1.2.5.

Capítulo 4 – Análise e discussão de resultados

Neste capítulo, os resultados são apresentados e discutidos. Primeiramente, serão analisadas as propriedades reológicas obtidas com o RPA e o Viscosímetro de Mooney. Posteriormente, são apresentados e discutidos os resultados da caracterização termográfica, onde se avalia a temperatura dos perfis extrudidos, ao longo dos vários momentos do processo de co-extrusão e, paralelamente, a largura registada nesses momentos. Finalmente, são apresentados os dados levantados do diagnostico do controlo inteligente do processo e discutidos os parâmetros de influência do controlo do processo na largura inicial.

4.1. Análise e discussão dos resultados obtidos: Teste A

Como referido nos capítulos anteriores, as propriedades reológicas dos compostos recolhidos antes e após a extrusão foram investigadas recorrendo ao RPA (Rubber Process Analyzer) e ao Viscosímetro de Mooney.

Viscosímetro de Mooney

A Figura 45 apresenta as curvas de viscosidade de Mooney obtidas nos ensaios realizados. Este foi operado durante 3 minutos a uma velocidade de 2 rotações por minuto e uma temperatura constante de 100 °C. A viscosidade de Mooney, como já foi mencionado, é uma unidade arbitrária que expressa a resistência oferecida pela borracha à deformação imposta pelo disco rotativo.

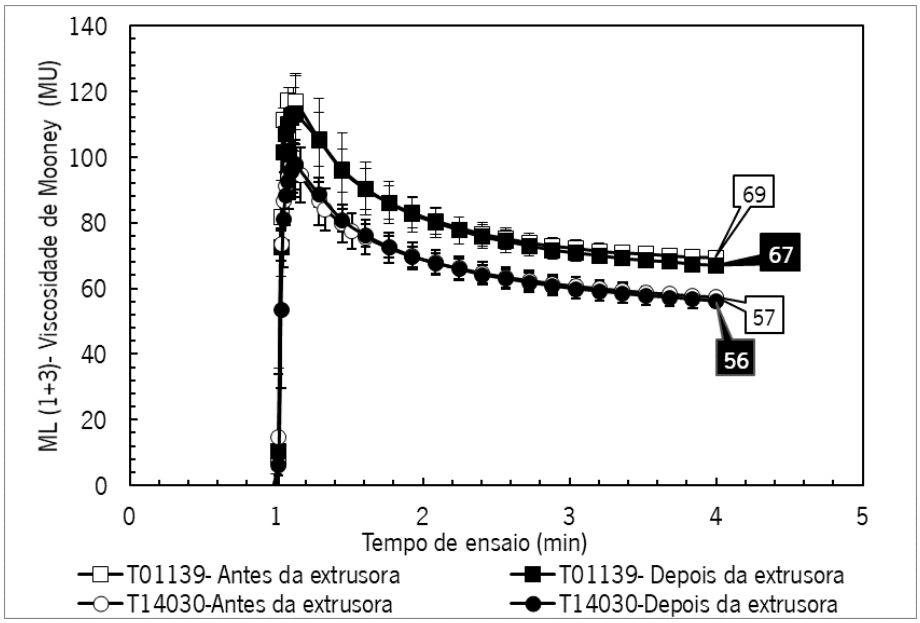


Figura 45- Curvas de viscosidade de Mooney dos compostos T01130 e T14030 testados antes e depois da extrusora.

Como é possível observar pela Figura 45, todas as curvas de viscosidade de Mooney apresentam um aumento acentuado imediatamente a seguir ao início da rotação do disco e, posteriormente, uma redução gradual assim que o binário atinge o máximo de resistência. Este fenómeno pode ser visto como comportamento tixotrópico natural das borrachas [92]. Tipicamente, o valor final de viscosidade de Mooney é relatado como o valor mais baixo registado nos últimos 30 segundos do teste.

Para o composto de Base (T01139) antes da extrusora a viscosidade de Mooney é dada por 69-ML 1+3 (100°C) e após a extrusora 67-ML 1+3 (100°C). Para o composto de Capa (T14030) a viscosidade das amostras recolhidas antes da extrusora é dada por 57-ML 1+3 (100°C) e após a extrusora 56-ML 1+3 (100°C). Seria de esperar que os compostos recolhidos depois da extrusora apresentassem uma viscosidade inferior à dos compostos recolhidos antes da extrusora, contudo isto não se verificou. A viscosidade dos compostos praticamente não se altera após o processamento, o que torna os resultados obtidos com este ensaio inexplicáveis.

RPA (Rubber Process Analyzer)

A Figura 46 mostra as curvas em valor médio e respetivo desvio padrão dos testes de varrimento em deformação realizados às amostras recolhidas. A Figura 46(A) apresenta os resultados correspondentes às amostras do composto de Capa (T14030) antes e depois da extrusora e a Figura 46 (B) do composto de Base (T01139) antes e depois da extrusora. Os varrimentos foram realizados numa gama de amplitude crescente, de 0,28% para 100%, a uma temperatura de 70°C e com uma frequência fixa de 1 Hz, com o intuito de avaliar a região viscoelástica linear do composto.

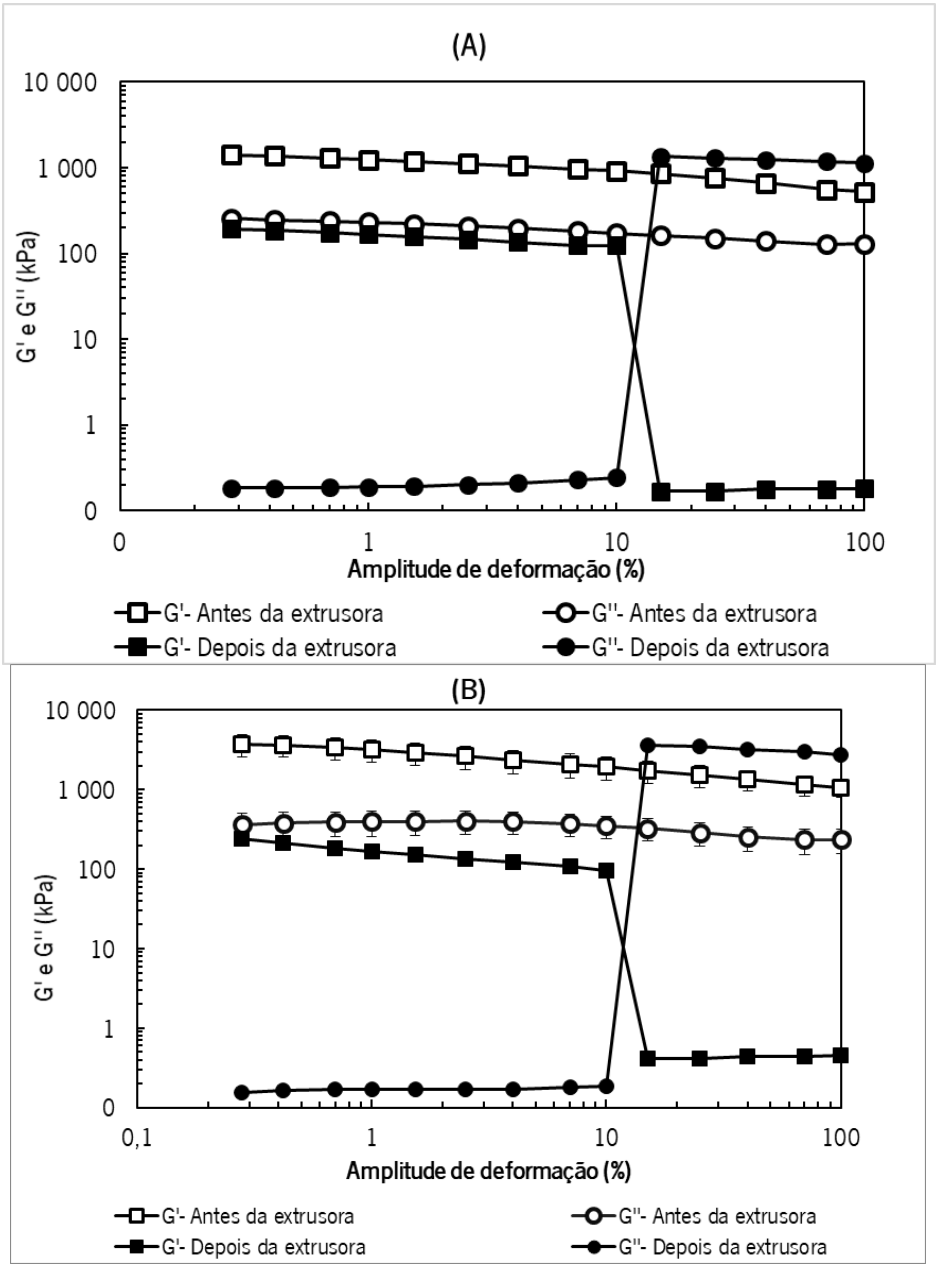


Figura 46- Curvas dos módulos elástico (G') e viscoso (G'') em função da amplitude de deformação; **(A)** Referente ao composto de Capa (T14030); **(B)** Referente ao composto de Base (T01139).

Em ambos os compostos recolhidos antes da extrusão (T14030 e T01139), verifica-se que as propriedades viscoelásticas (G' e G'') são dependentes da deformação imposta. Ou seja, não se verifica uma região viscoelástica linear para nenhum dos compostos testados, mesmo na menor gama de deformação possível. Isto é explicado pois, com a presença de cargas na composição do composto de borracha, a região viscoelástica linear não existe [93,94]. Também para as amostras recolhidas após a extrusão, não se verifica uma região viscoelástica linear, pois a extrusão não tem um impacto destrutivo sobre as cargas [95].

Contudo, a partir de 10% de deformação ambos os módulos (elástico e viscoso) apresentam um comportamento completamente díspar. Estes resultados indicam uma perda completa da elasticidade do composto, cuja origem não é clara. Possivelmente, existiu uma falha não detetada na operação do varrimento feito pelo RPA. Também é visível que todos os varrimentos apresentam a mesma tendência pois o desvio padrão associado é muito pequeno e em alguns casos é tao pequeno que não é visível nos gráficos obtidos.

A repetibilidade dos varrimentos dificulta ainda mais a compreensão do fenómeno verificado. Além disso, não existe suporte bibliográfico que permita compreender e justificar o fenómeno verificado na caraterização dos compostos recolhidos após a co-extrusão. É importante ter em mente que a teoria da viscoelasticidade linear é válida apenas quando a deformação total é muito pequena [96]. O equipamento utilizado (RPA2000) permite apenas atingir amplitudes de deformações mínimas de ± 0,28%, o que poderá também justificar a dificuldade encontrada em identificar a região viscoelástica linear dos compostos de borracha testados. Uma vez que não foi possível determinar uma deformação não destrutiva através do varrimento em amplitude, não se achou pertinente proceder para o ensaio de varrimento em frequência.

- **Conclusões parciais: Teste A**

- Nos ensaios de Mooney não se verificou alteração de viscosidade dos compostos após processamento;
- Com o varrimento em amplitude de deformação não foi possível verificar um regime viscoelástico linear, dada a presença de cargas no composto. Assim, descartou-se o estudo das propriedades viscoelásticas dos compostos dada a impossibilidade de realizar o varrimento em frequência no regime linear dos materiais em estudo.
- Num âmbito geral, os resultados obtidos com a caraterização reológica mostraram-se contraditórios e inconclusivos. Dada a inexistência de suporte científico que permitisse suportar os resultados obtidos, **optou-se por não considerar a variável reologia do composto no estudo**.

4.2. Análise e discussão dos resultados obtidos: Teste B

Como mencionado no Capítulo 3- Materiais e Métodos, a medição do perfil de temperaturas do piso foi realizada imediatamente à saída da fieira, com recurso à técnica de termografia por infravermelhos. A partir da metodologia descrita no Capítulo 3- Materiais e Métodos, foi possível determinar um regime estacionário, entre os 20% e 100% do tempo total da co-extrusão.

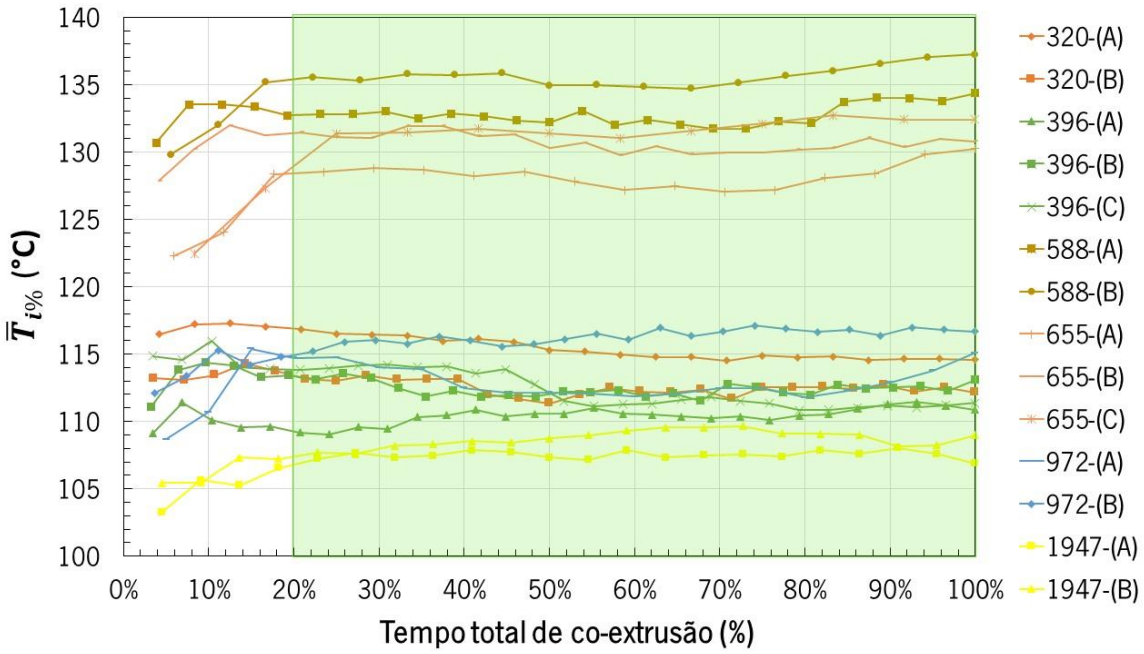


Figura 47- Evolução da temperatura média dos perfis com o tempo de co-extrusão, de todos os pisos produzidos.

A Figura 47 apresenta a evolução da temperatura média do perfil em função do tempo total de co-extrusão, para os vários pisos produzidos e acompanhados no estudo, descritos pelo número que identifica o piso (exemplo: 320) e a letra que identifica o dia em que se acompanhou a produção (exemplo: (B)). Através desta figura é possível observar que, a estabilidade dos perfis de temperatura é alcançada a partir de 20% do tempo de co-extrusão. Portanto, a zona de estabilidade do processo em termos de temperatura é compreendida entre 20% e 100% do tempo.

Após analisar o comportamento da largura inicial de todos os pisos estudados, compilou-se a informação na Tabela 12, juntamente com o respetivo desvio absoluto médio (DAM) à temperatura de estabilidade ($T_{estável}$) e o respetivo desvio padrão.

Tabela 12- Correlação uniformidade da variável largura inicial e desvio absoluto médio à temperatura estável

Código do piso	Largura inicial (*)	DAM (°C)	DP DAM (*)
1947	C	0,42	±1,07
	PNC	0,58	±1,12
320	PNC	0,20	±0,66
	PNC	0,28	±0,94
396	C	0,08	±0,65
	C	0,19	±0,76
	PNC	0,34	±1,53
655	C	0,58	±1,88
	C	0,03	±0,87
	PNC	1,21	±2,81
588	PNC	0,07	±0,79
	PNC	0,57	±1,69
972	C	0,10	±1,57
	C	0,50	±1,14

(*) C- Conforme; PNC- Parcialmente não conforme; DP DAM- Desvio padrão do DAM

Através da análise da Tabela 12 verifica-se que nos casos em que, para o mesmo artigo, se verificam os dois tipos comportamento da largura inicial (C e PNC), o desvio absoluto médio e o respetivo desvio padrão é sempre superior no caso em que a largura é PNC. Ou seja, $DAM_{PNC} > DAM_{C}$ e $DP\ DAM_{PNC} > DP\ DAM_{C}$. Além disso, verifica-se casos em que para o mesmo artigo, o comportamento da largura foi o mesmo nos dois acompanhamentos. O que não nos permite verificar nenhuma tendência.

- **Conclusões parciais: Teste B**

Sabendo que, tanto maior o DAM maiores são as variações de temperatura no decorrer do processo, podemos concluir **existem variações de temperatura no decorrer do processo** que têm um **impacto negativo na largura inicial dos pisos**.

4.3. Análise e discussão dos resultados obtidos: Teste C

Como descrito no Capítulo 3- Materiais e Métodos, a estratégia de diagnóstico do sistema de controlo do processo de co-extrusão consistiu em acompanhar em linha as várias produções do piso de código 806. Posteriormente, recolheram-se os dados registados pelo sistema na base de dados, o que possibilitou a construção dos gráficos representativos das co-extrusões seguidas.

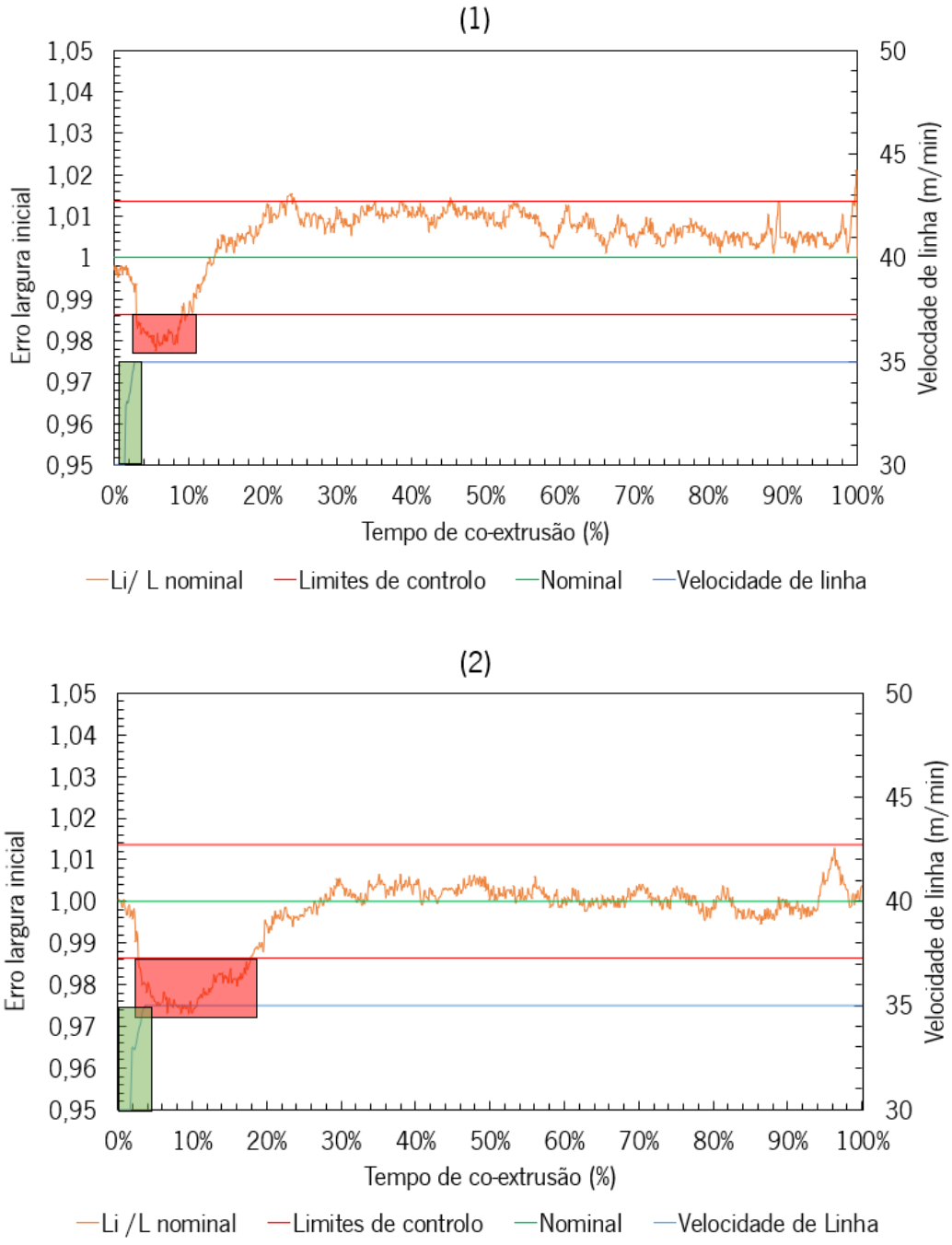


Figura 48- Exemplo de resultados obtidos do erro associado à largura inicial do perfil em função da velocidade de linha controlado pelo sistema RMEA.

Ambos os exemplos ilustrados na Figura 48, mostram o erro verificado da largura inicial perante a largura inicial nominal, em função da velocidade de linha da produção do piso selecionado para o estudo. Pela análise da Figura 48, tanto do resultado (1) como o (2), podemos verificar, que nos primeiros instantes da co-extrusão, a largura está no limite nominal. Contudo, assim que a rampa de aceleração da velocidade de linha termina, a largura inicial do perfil tem tendência a decair.

Dado o conhecimento adquirido do processo de co-extrusão da empresa, considera-se que esta aceleração é demasiado abrupta e repentina, pois num intervalo de aproximadamente 25 segundos, a velocidade de linha aumenta de 30 m/min para 35 m/min. Ademais, o manual do sistema indica que quando a largura inicial é não-conforme, o algoritmo pré-programado do controlo ajusta a velocidade de linha para colmatar o défice de largura. Em momento algum o RMEA ajustou a velocidade de linha para colmatar o défice de largura inicial verificado.

Este comportamento, é uma tendência que se verificou nas restantes produções acompanhadas deste mesmo artigo, e que pode ser consultado no ANEXO D. Segue também na Tabela 13, um resumo das restantes produções acompanhadas.

Tabela 13-Percentagem de pisos rejeitados no processo de diagnóstico do sistema RMEA

Teste	Tempo de realização da rampa (min)	Tempo total de extrusão (min)	Total de pisos produzidos	Pisos rejeitados (%)
1	0,42	18	346	7%
2		13	248	15%
3		19	359	10%
4		25	471	5%
5		19	345	10%
6		32	600	6%
7		22	414	4%
8		23	433	13%

Como é possível verificar pela Tabela 13, todas as produções acompanhadas apresentaram rejeição de pisos por largura inicial não conforme. As percentagens de rejeição de pisos oscilaram de produção para produção, não mostram nenhum tipo de tendência. Contudo, evidenciam a carência de controlo da largura inicial no algoritmo pré-programado do RMEA.

- **Conclusões parciais: Teste C**

A metodologia deste teste permitiu **identificar uma lacuna no algoritmo pré-programado** do sistema de **controlo inteligente do processo**, o que se presume poder prejudicar fortemente a obtenção de perfis estáveis, em concreto na **variável largura inicial**, como aconteceu em todos os testes de produção monitorizados.

Considera-se que **existe um défice de ações corretivas no controlo da variável largura inicial**, tanto **na fase de arranque** como no decorrer do **restante processo** e a função rampa está definida com parâmetros que não são os necessários à fase de arranque do processo.

4.4. Apreciação global dos resultados

Em virtude da exclusão da variável "Reologia do composto"do estudo e apesar da avaliação da variável "Temperatura do perfil co-extrudido à saída da fieira "ter sido bastante positiva. Optou-se por prosseguir com o estudo da variável "Controlo inteligente do processo". Isto porque, optar por tentar solucionar a distribuição não uniforme e instável da temperatura dos perfis co-extrudidos ao longo do processo, não seria uma solução viável dados os recursos disponíveis. Assim, o estudo da variável "Controlo inteligente do processo ", era a única abordagem que nos iria permitir resolver o problema com alguma autonomia, dados os recursos do projeto nesta etapa.

Capítulo 5 - Desenvolvimento de novo conceito de controlo: EPIC

Este capítulo surge motivado pelos problemas existentes no controlo inteligente do processo identificados com o Teste C do Capítulo 4. Neste capítulo, apresenta-se e discute-se a abordagem proposta para resolver as lacunas identificadas. Primeiramente é apresentado o planeamento elaborado para a proposta de um novo conceito de controlo inteligente do processo de co-extrusão de pisos. Após o planeamento, apresenta-se a estratégia de aferição da viabilidade do planeamento proposto e discutem-se os resultados obtidos na aferição efetuada.

Planeamento

Como foi explorado e debatido no capítulo anterior, a metodologia de diagnóstico do atual controlo inteligente do processo (RMEA), permitiu identificar lacunas no atual controlo inteligente do processo, as quais motivaram uma proposta de um novo controlo inteligente. Subsequentemente, identificaram-se as funcionalidades de que o novo conceito deveria ser dotado, visando colmatar as funcionalidades em défice identificadas no atual controlo inteligente do processo (RMEA). A Tabela 14 resume as especificações do novo sistema a desenvolver. Do lado esquerdo indicam-se as funcionalidades limitantes da atual ferramenta de controlo inteligente (RMEA) e do lado direito as funcionalidades a implementar no novo sistema. A nova proposta foi designada por *Extrusion Process Intelligent Controller* (EPIC).

Tabela 14- Comparação das funcionalidades em défice VS desejadas para o sistema de controlo inteligente

Controlo existente (RMEA)	**Proposta de novo controlo (EPIC)**
Rampa de aceleração estática	Rampa de aceleração dinâmica e inteligente
Ausência de controlo da largura inicial	Controlo das variáveis massa linear e largura inicial em simultâneo

Em conformidade com o indicado na Tabela 14 , sugere-se que o EPIC seja dotado de uma função de rampa dinâmica e inteligente diferente da rampa de aceleração estática integrada no RMEA. A Figura 49 ilustra o que se entende por rampa de aceleração estática e rampa de aceleração dinâmica e inteligente, num gráfico que apresenta a velocidade de linha em metros por minuto (m/min) em função do tempo de co-extrusão em segundos (s).

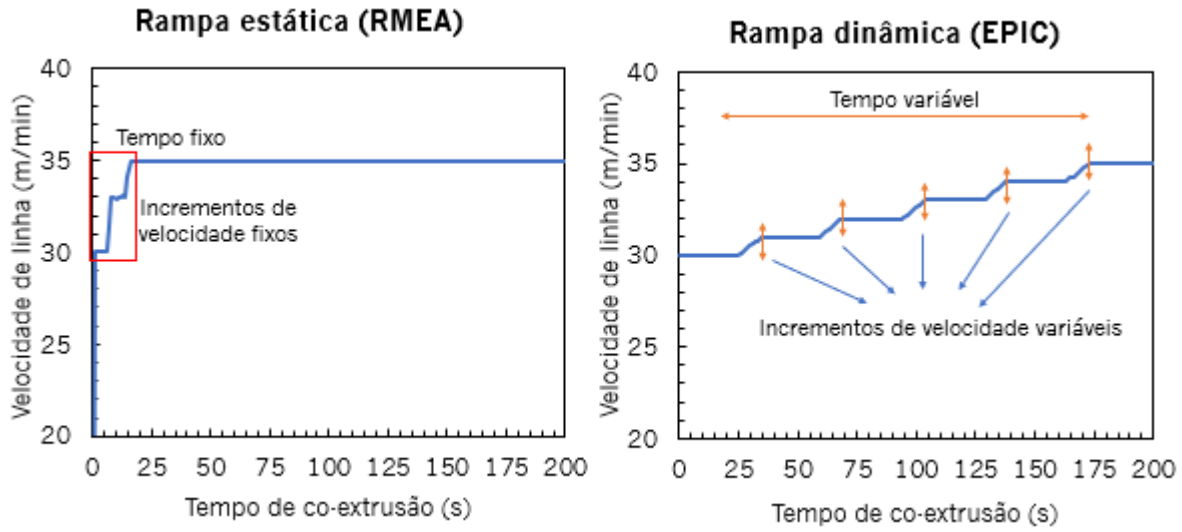


Figura 49- Tipo de função rampa dos controlos inteligentes do processo.

Como podemos verificar pela Figura 49, a rampa do RMEA tem um formato fixo, cujos incrementos de velocidade e o tempo total de realização da rampa são sempre os mesmos, independentemente do tipo de artigo que esteja a ser co-extrudido. Já o EPIC deverá ter uma função rampa inteligente em que a leitura da largura sirva como fator de controlo das ações de incremento à velocidade linear da linha. Desta forma, como descrito na Figura 49, os incrementos de velocidade serão variáveis, podendo a rampa ter tantos incrementos de velocidade quantos os necessários até atingir o valor nominal de velocidade linear de linha, tentando assegurar as especificações do produto obtido.

Como foi identificado no Capítulo 1, o algoritmo pré-programado do RMEA já integra o controlo da massa linear, e nunca se identificaram problemas neste controlo. Dada a limitação temporal para a realização desta etapa de desenvolvimento e uma vez que não existiam os recursos necessários para planear o controlo simultâneo da variável largura inicial e da variável massa linear, optou-se por apenas tratar o controlo da variável largura inicial. Esta opção foi adotada com a consciência de que numa fase mais avançada do desenvolvimento do EPIC, e com os recursos necessários, se deverá trabalhar numa forma de conjugar o controlo de ambas as variáveis em simultâneo. Uma vez que os controladores da largura inicial e da massa linear, representam algoritmos de processos separados, que, contudo, ocorrem em simultâneo, devem ser estabelecidos de forma a que não exista conflito entre eles.

Uma vez especificado o novo conceito, para o controlo da variável largura inicial, procedeu-se ao desenho do algoritmo necessário para dotar o EPIC da inteligência desejada.

A Figura 50 ilustra o fluxograma do processo pretendido para o controlo da largura inicial.

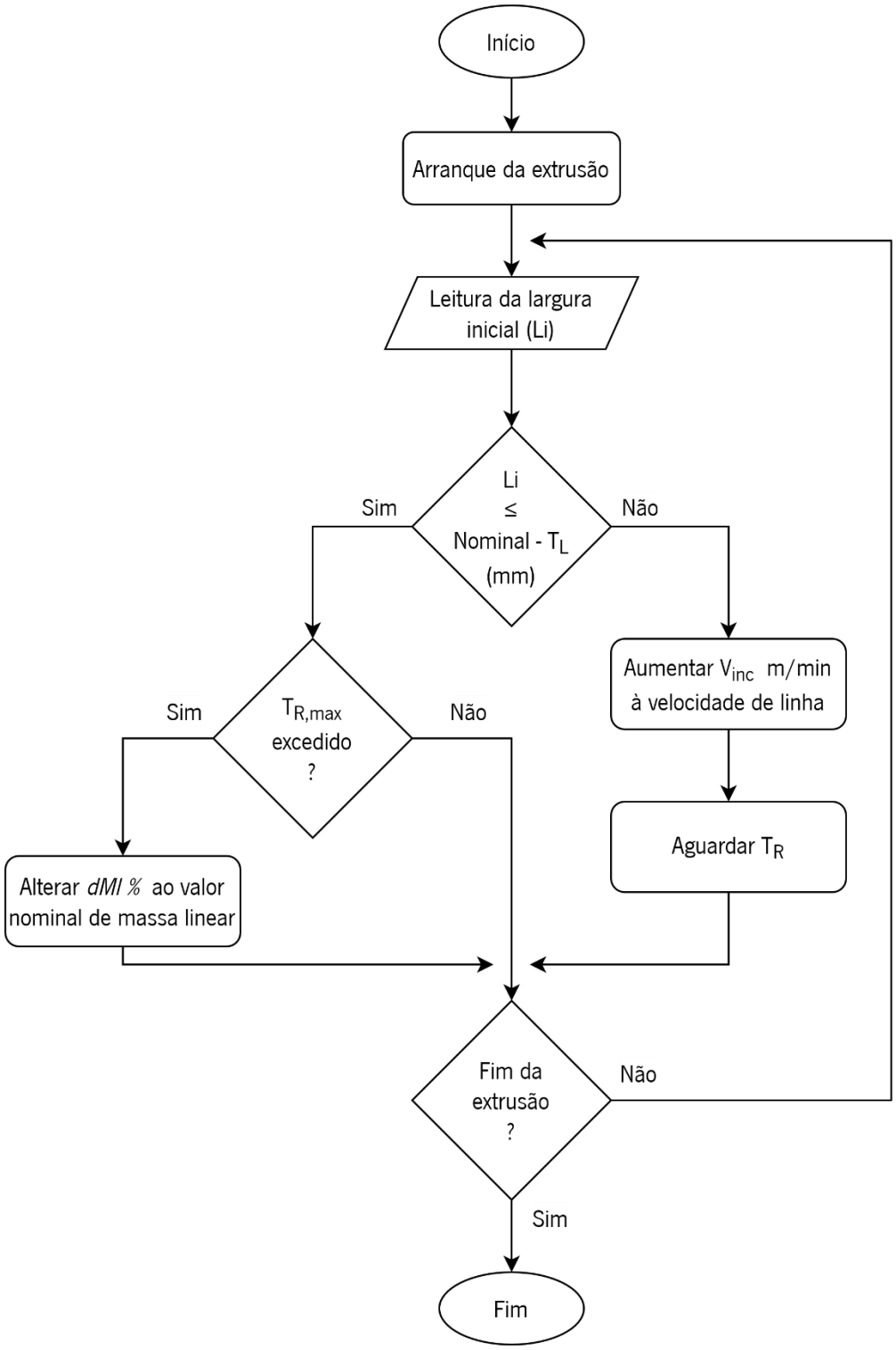


Figura 50- Fluxograma do processo de controlo da largura inicial-EPIC

Como se pode verificar pela Figura 50 o processo de controlo da largura inicial acomoda o controlo das situações em que a largura inicial está ou não a baixo dos limites de controlo estipulados para o artigo em produção. Isto é, se a largura inicial lida for menor ou igual ao valor nominal de largura subtraída a uma tolerância (T_L), o controlador não deverá incrementar a velocidade da linha. Deverá aguardar que o piso estabilize a largura sem acelerar a linha, caso se tenha excedido o *Tempo máximo*

sem reação ($T_{R,\,max}$) e o piso continue fora dos limites nominais, então o controlo da largura deverá enviar sinal ao controlo da massa linear para que se altere o valor nominal deste. Alterando o valor nominal do controlo da massa linear, evitar-se-á que as ações corretivas do controlador da massa linear afetem a obtenção da largura.

O *tempo de reação* (T_R) é dado pela Equação (10), este trata-se do tempo a aguardar até à próxima leitura e é dado pela seguinte equação

$$T_R = \frac{Distância\ entre\ a\ fieira \text{ e a } câmara\ de\ leitura\ da\ largura}{Velocidade\ da\ linha\ no\ momento} \qquad (10)$$

O *tempo máximo sem reação* ($T_{R,\,max}$) trata-se do tempo a determinar admissível em que a largura esteja fora dos limites sem que no fim da linha sejam segregados demasiados pisos.

Nos casos em que a largura inicial está no intervalo definido pelo valor nominal e tolerância, o controlador envia um sinal de incremento (V_{inc}) em metros por minuto à velocidade de linha.

Neste fluxograma são apresentados parâmetros como T_L, V_{inc}, dMl e o $T_{R,\,max}$, que nesta etapa de desenvolvimento não foi possível definir, dados os recursos (equipamentos) existentes, e deverão ser determinados em trabalhos futuros.

O valor nominal de largura inicial e respetiva tolerância variam de artigo para artigo, pois os requisitos nominais dependem do tipo de piso a produzir.

Ressalva-se que este controlo da largura inicial apenas acomoda situações em que o valor medido é inferior ao máximo, pois não se identificaram situações em que a largura se apresentava acima dos limites especificados. Apesar da consciência de que este fenómeno poderá acontecer, nesta etapa de desenvolvimento o foco foi apenas solucionar o problema que motivou este projeto.

Aferição do EPIC

Procedimento de aferição

Como procedimento de aferição da viabilidade da metodologia de controlo concebida (EPIC), foram realizados testes na co-extrusora com recurso à funcionalidade "Controlo Manual" do sistema atual (RMEA). Esta funcionalidade implica desligar o controlo automático que governa o ajuste dimensional do piso e permite que as manipulações das variáveis do processo sejam realizadas pelo utilizador.

Neste estudo, apenas foi possível simular e controlar exclusivamente a variável em estudo (largura inicial) através dos incrementos de velocidade da linha, uma vez que o modo manual desativa todos os controlos da co-extrusora e não é possível, manualmente, controlar as restantes variáveis. Assim, este estudo de aferição realizou-se com recurso à câmara de verificação da largura inicial, que, como mencionado, tem a função de permitir ao operador visualizar a largura inicial do piso na linha, em conformidade com o ilustrado na Figura 51.

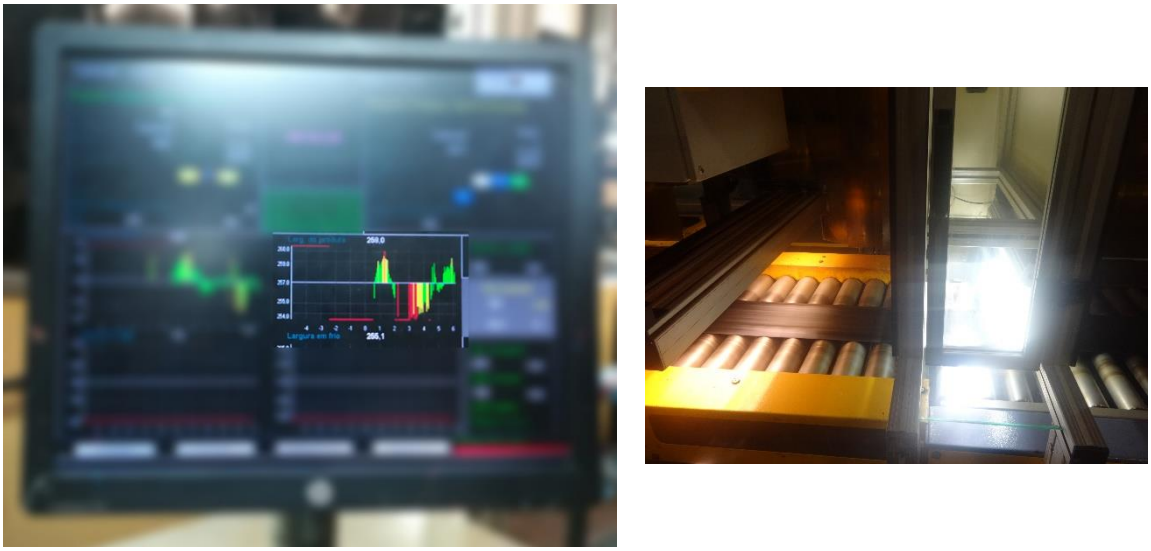


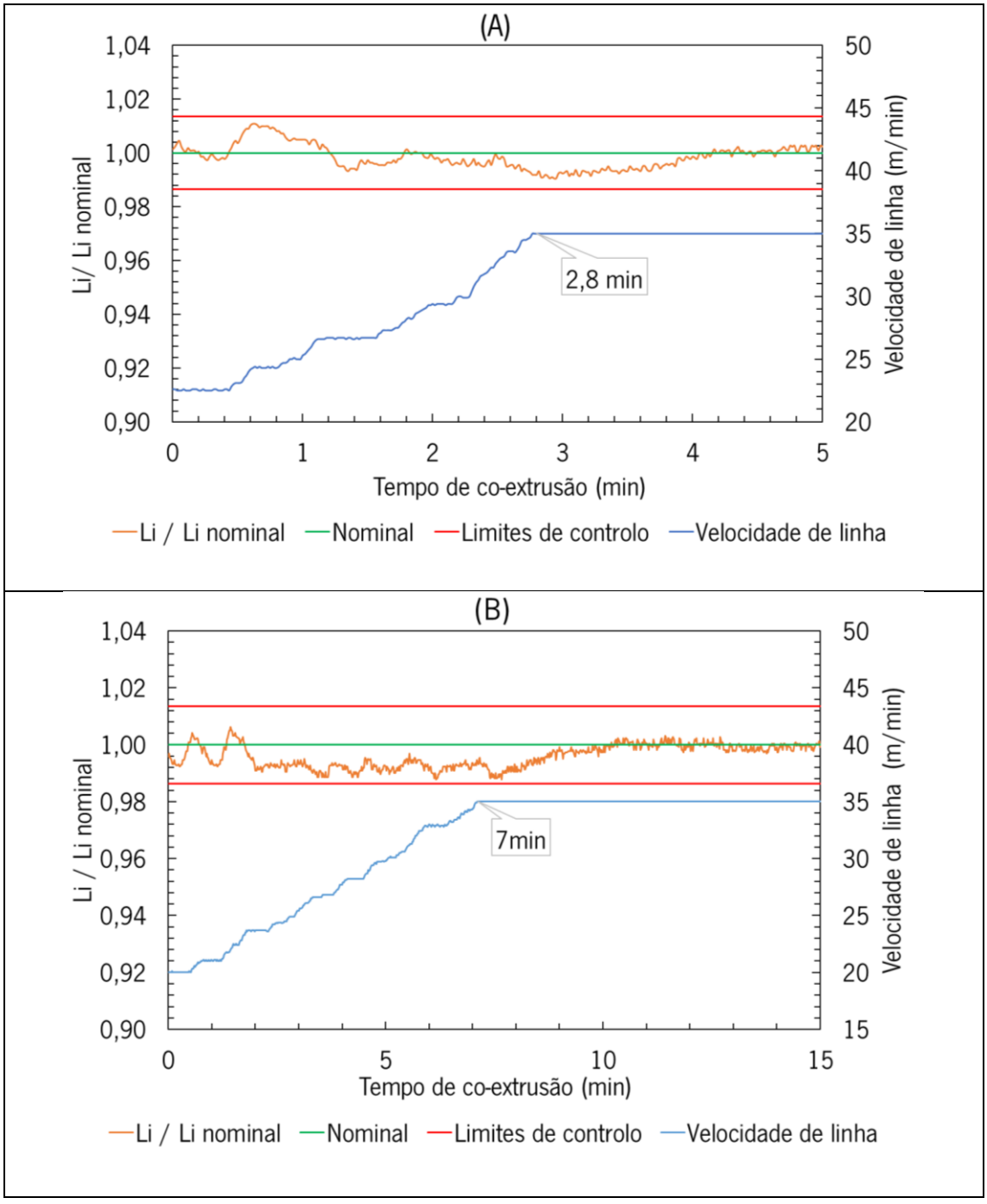
Figura 51- (A) Interface utilizador-máquina; **(B)** Câmara de verificação de largura inicial.

A Figura 51 (A) apresenta a interface utilizador-máquina a partir da qual foi possível, verificar a largura inicial do pisos lida pelo dispositivo ótico de leitura (Figura 51 (B)) e operar a máquina de forma autónoma. Dado que através da interface máquina-operador apenas é possível visualizar a largura inicial do piso e a velocidade de linha, não foi possível cumprir com rigor, o método de aferição do fluxograma desenhado. Dadas estas limitações, durante o acompanhamento das produções de aferição, a estratégia adotada, consistiu em incrementar em passos discretos a velocidade de linha consoante a largura que se verificava no momento. Os incrementos de velocidade efetuados não foram realizados com um critério específico, mas sim com base na sensibilidade existente no momento do processamento.

É também importante referir que, mesmo desligando o processo automático, o sistema (RMEA) regista os dados do processo e permite a exportação e análise destes, como realizado nos testes de diagnóstico descritos na Secção 3.3.3. O piso selecionado para este estudo, foi o mesmo piso com o qual se realizou o diagnóstico, ou seja, o piso de código 806. Os resultados do procedimento de aferição adotado, serão apresentados em seguida.

Análise de Resultados

Os resultados obtidos com a estratégia adotada estão ilustrados na Figura 52, em gráficos em que no eixo primário das ordenadas apresenta a razão entre a largura inicial e o seu valor nominal, no eixo secundário das ordenadas a velocidade de linha em metros por minuto (m/min) e no eixo das abcissas o tempo de co-extrusão em percentagem (%).



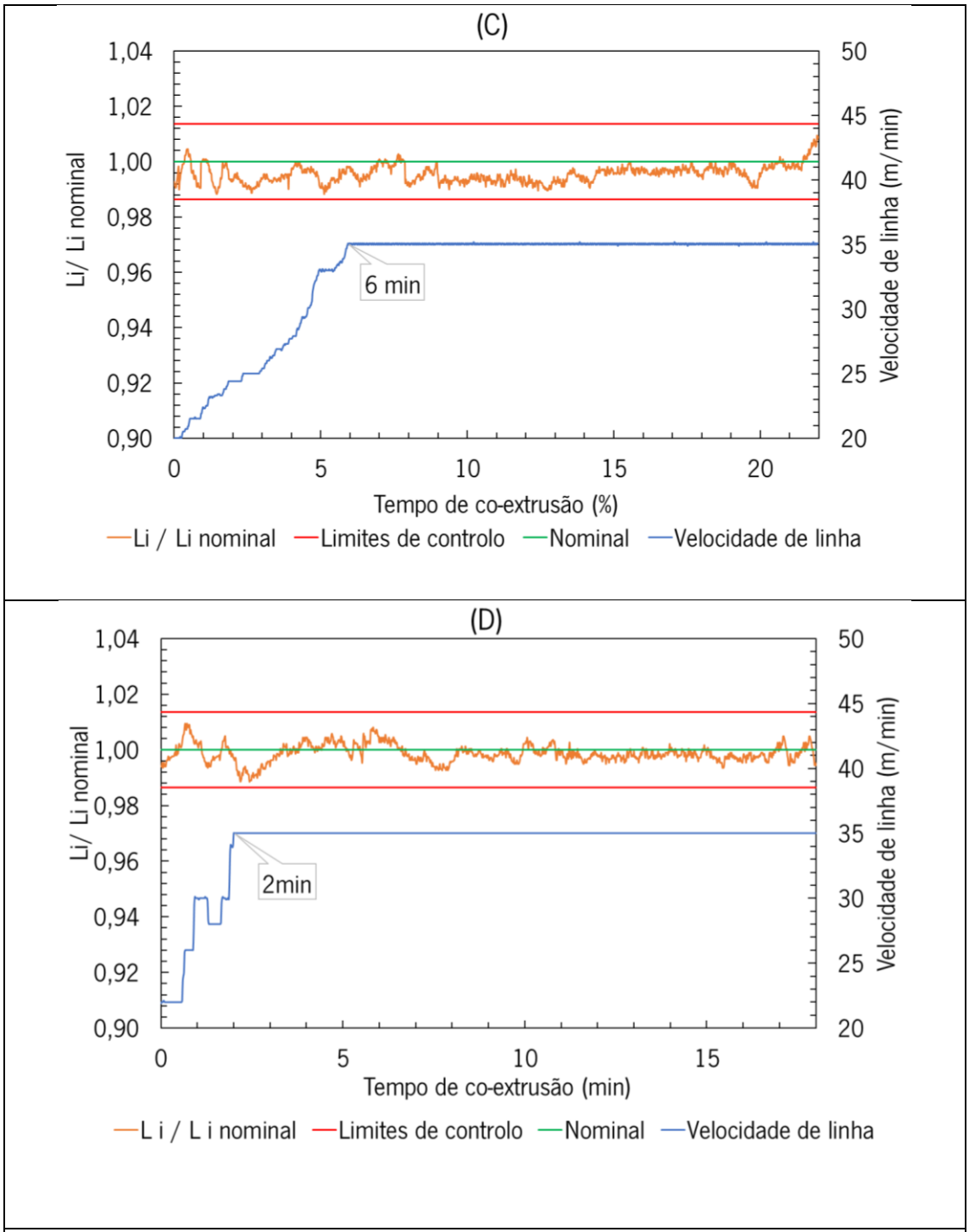


Figura 52- Testes de simulação da aceleração da rampa de velocidades de linha com recurso à funcionalidade manual do RMEA; **(A)** Teste 1; **(B)** Teste 2 ; **(C)** Teste 3; **(D)** Teste 4.

A Figura 52 apresenta os dados das simulações teste realizadas na co-extrusora. Como é possível verificar pelos resultados apresentados, os incrementos de velocidade de linha feitos em todos os processos acompanhados foram realizados de forma distintas, o que ilustra a diversidade daquilo que deverão ser as rampas de aceleração dinâmicas e inteligentes propostas para o EPIC.

Será importante salientar que, pelas limitações acima referidas, estes testes não seguem de forma rigorosa a procedimento definido. Ainda assim, com estes testes foi possível verificar que com incrementos de velocidade discretos se podem evitar acelerações bruscas, que se verificou experimentalmente afetarem negativamente as dimensões do produto.

Ao contrário do que foi identificado no diagnóstico do sistema RMEA, após terminar a rampa de aceleração da velocidade de linha, a largura inicial do produto não apresentou a típica tendência para decair. O que sustenta o efeito, debatido na Secção 4.3, de que a rampa de aceleração do RMEA impõe estiramentos bruscos aos pisos que levam ao afastamento das dimensões nominais e consequente rejeição dos mesmos. Com esta abordagem, foi possível obter perfis sempre com a largura inicial dentro dos limites especificados, sem que existissem não conformidades, durante todo o tempo de produção.

Os estudos efetuados, permitiram também verificar que o mesmo piso, produzido em dias diferentes, requereu diferentes rampas de aceleração, induzidas por diferentes comportamentos em termos de largura. Os tempos da aceleração da velocidade de linha foram igualmente distintos. A Tabela 15 apresenta as melhorias obtidas nos testes do EPIC, essencialmente em termos de aproveitamento da quantidade de pisos produzidos e cadência de produção, em comparação com o alcançado nos testes de diagnóstico realizados ao sistema RMEA.

Tabela 15- Percentagem de pisos rejeitados consoante o tipo de rampa de aceleração

Rampa de aceleração	Teste	Tempo de realização da rampa (min)	Tempo de produção efetivo (min)	Total de pisos produzidos	Pisos rejeitados (%)	Cadência de produção (pisos/min)
Dinâmica e variável (EPIC)	A	2,8	5	79	0%	16
	B	7	16	266		17
	C	6	22	384		17
	D	2	18	316		18
Estática (RMEA)	1	0,42	22	414	4%	19
	2		13	248	15%	19
	3		23	433	13%	19
	4		19	359	10%	19
	5		18	346	7%	19
	6		32	600	6%	19
	7		19	345	10%	18
	8		25	471	5%	19

Pela análise da Tabela 15 é possível verificar que independentemente do tempo total de co-extrusão, da quantidade de pisos produzidos e do tempo de realização da rampa, se esta for realizada de forma discreta e gradual, consegue-se aproveitar pisos durante todo o tempo do processo, sem que exista rejeição de pisos. De facto, a cadência de produção do EPIC difere aproximadamente menos 2 pisos/min em relação ao RMEA, contudo as diferenças não são significativas face à quantidade de pisos que se conseguiu aproveitar com o desempenho da rampa do EPIC.

- **Conclusões parciais- Aferição do EPIC**

Os resultados obtidos com estes testes ilustram o potencial do novo modelo explorado na presente dissertação. Contudo, salienta-se que seria necessário realizar mais estudos para comprovar com mais rigor a eficácia do mesmo. Mais, em estudos posteriores dever-se-á completar o modelo recorrendo a outros equipamento e estratégias, dadas as limitações encontradas no uso do modo manual do RMEA na presente fase do projeto.

Capítulo 6 – Conclusões e Sugestão de Trabalhos Futuros

Neste capítulo é apresentada uma visão geral do trabalho realizado ao longo desta dissertação de acordo com os objetivos estabelecidos no Capítulo 1. Serão feitas também sugestões de trabalhos futuros, visando complementar e enriquecer o trabalho desenvolvido neste projeto.

Conclusões

Com a realização deste trabalho, pretendia-se estudar as variáveis do processo de co-extrusão de pisos que têm influência na estabilidade dimensional destes, em concreto na largura inicial. As 3 variáveis estudadas, que se afiguraram dominantes no problema em análise, foram a reologia do composto, a temperatura do perfil co-extrudido à saída da fieira e o controlo inteligente do processo de co-extrusão.

Os resultados alcançados nesta dissertação com a caracterização reológica realizada aos compostos de borracha utilizados na aplicação em pisos de pneu, demonstram a elevada complexidade da caracterização destes. Os equipamentos e metodologias.de caraterização não foram os adequados para o objetivo do estudo e a avaliação desta variável não se mostrou útil, o que resultou ter sido descartada do estudo.

No âmbito dos testes realizados para aferir a temperatura do perfil co-extrudido à saída da fieira, correlacionando esta com a largura inicial obtida no decorrer do processo, foi possível comprovar que a medição da temperatura do co-extrudido à saída da fieira fornece informações importantes sobre as condições de produção do perfil. Neste âmbito, verificou-se a existência de flutuações de temperatura no perfil co-extrudido, que mostraram um impacto negativo na largura inicial dos pisos. Estes resultados ilustram o potencial desta abordagem, contudo a implementação da mesma requeria meios que não estavam disponíveis para este trabalho, o que não possibilitou a exploração do mesmo.

A metodologia de diagnóstico do atual controlo inteligente do processo, permitiu identificar problemas no seu algoritmo pré-programado, as quais mostraram limitar e dificultar a obtenção de perfis com as dimensões especificadas. Dadas as lacunas identificadas no algoritmo pré-programado do atual sistema de controlo inteligente da co-extrusão (RMEA), desenvolveu-se uma nova proposta de controlo inteligente do processo, o *Extrusion Process Intelligent Controller* (EPIC). Esta abordagem, foi aferida na fase terminal do presente projeto de mestrado e os resultados obtidos nos testes efetuados mostraram

o potencial da mesma para assegurar a largura inicial dos pisos produzidos ao longo de todo o processo de produção.

Sugestão de Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram identificar novas vias para dar continuidade ao estudo das variáveis do processo de co-extrusão, que têm influência na largura inicial dos pisos co-extrudidos. Portanto, sugere-se os seguintes tópicos como trabalhos futuros:

- No campo da reologia dos compostos de borracha existe ainda muito por investigar. Recomenda-se a realização de testes de caracterização que se aproximem mais das condições do processo de extrusão de modo a criar soluções que permitam implementar a simulação e a modelação numérica na área da co-extrusão de borrachas.
- No que diz respeito à existência de flutuações de temperatura no perfil co-extrudido e no decorrer do processo de co-extrusão, sugere-se que os controlos existentes das temperaturas do processo, do co-extrudido e do fundido sejam estudados com maior cuidado e pormenor. Para tal, deverá rever-se o tipo de controlo efetuado pelos sistemas diferenciais integrais proporcionais, que regulam as temperaturas do processo, com a finalidade de garantir que não existem defeitos neste tipo de controlo que possam estar a impor à borracha e ao processo de co-extrusão flutuações indesejadas e prejudiciais à aquisição de artigos com estabilidade dimensional.
    - Quanto ao EPIC, sugere-se que este seja instalado ao nível de um Controlador Lógico Programável, pois este tipo de controladores lógicos permitem implementar algoritmos pré-programados de controlo e consequentemente realizar uma aferição do modelo mais apropriada possibilitando a determinação dos fatores e valores que ficaram por determinar com a funcionalidade manual a que se recorreu neste projeto.

Referências

[1] Headquarters & Plants. (Consultado a: 12/12/2019). Disponível em: https://www.continental-tires.com/transport/company/businessunit/headquarters-plants.

[2] História. (Consultado a: 01/01/2020). Disponível em: https://www.continental.com/pt-pt/empresa/história.

[3] C. Mabor, *Manual da Qualidade da Divisão de Pneus da Continental AG*, 2018.

[4] Continental Pneus, Continental retoma negócio Agro. (Consultado a: 01/02/2020). Disponível em: https://www.continental-pneus.pt/industriais/imprensa/notícias/continental-retoma-negocio-agro.

[5] Componentes para pneus. (Consultado a: 12/12/2019). Disponível em: https://www.neumaticos-uniroyal.es/turismo/catalogo-de-neumatico/todo-sobre-el-neumatico/componentes-de-los-neumaticos.

[6] B.E. Lindenmuth, "Chapter 1: An Overview of Tire Technology," in: *Pneum. Tire*, 2006.

[7] T. French, *Tyre Technology*, IOP Publishing Ltd, 1989. ISBN 0852743602.

[8] B. Rodgers, W. Walter, "Tire Engineering," in: *Sci. Technol. Rubber Third Ed.*, 2005. ISBN 0124647863.

[9] R. Evans, A. Evans, "The Composition of a Tyre : Typical Components." *Waste Resour. Action Program.* (May): 5 (2006).

[10] Componentes | Ciência e Tecnologia da BorrachaCiência e Tecnologia da Borracha. (Consultado a: 12/12/2019). Disponível em: https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/pneus/o-fabrico-de-pneus/componentes/.

[11] G.R. Hamed, "Materials and Compounds," in: *Eng. with Rubber How to Des. Rubber Components*, 2001. ISBN 1569902992.

[12] M.S. Evans, *Tyre Compounding for Improved Performance*, 2002. ISBN 1859573061.

[13] M. Morton, *Rubber Technology: Third Edition*, 2010. ISBN 9781461578253.

[14] B. Rodgers, *Rubber Compounding: Chemistry and Applications*, 2016. ISBN 9781482235500.

[15] Habasit-Solutions in motion, *Tire Industry - Conveyor and Processing Belts for Rubber Handling and Tire Manufacturing*, 2016.

[16] B.G. Crowther, *Rubber Extrusion Theory and Development*, 1998. ISBN 9788578110796.

[17] HF-TireTech, Triplex Extrusion Line. (Consultado a: 12/12/2019). Disponível em: https://www.hf-tiretechgroup.com/downloads/docs/31d088a8e1a84bdb75230495f8e1c720.

[18] Harburg-Freudenberger, *Extrusion Lines for Performance Tire Manufacturing Kautschuktechnik Extrusion*, .

[19] C. Rauwendaal, "Different Types of Extruders," in: *Polym. Extrus. 5th Ed.*, 2014. ISBN

9781569905166.

[20] TROESTER, Pin-Type Extruder: TROESTER. (Consultado a: 03/14/2020). Disponível em: https://www.troester.de/index.php?id=extruder&L=1.

[21] G. Nijman, *Harburg-Freudenberger Maschinenbau GmbH Relaxed extrusion: A very important precondition for high quality treads*, 2017.

[22] A.K. Bhowmick, M.M. Hall, H.A. Benarey, *Rubber Products Manufacturing Technology*, 1994. ISBN 0824791126.

[23] A.B.B. Strong, *Plastics: Materials and Processing*, 3rd ed.2006. ISBN 0-13-114558-4.

[24] G. PSI FLS Fuzzy Logik & Neuro Systeme, *Confidential: RMEA – Special System Settings for Tread Extrusion Lines*, 2011.

[25] J.S. Dick, *Rubber Technology: Compounding and Testing for performance*, 2nd ed.HANSER, 2009. ISBN 9781569904657.

[26] O.S. Carneiro, J.M. Nóbrega, *Design of Extrusion Forming Tools*, 2012. ISBN 9781847355171.

[27] C. Rauwendaal, "Functional Process Analysis," in: *Polym. Extrus. 5th Ed.*, 2014. ISBN 9781569905166.

[28] W. Michaeli, S. Kaul, "Approach of an automatic extrusion die optimization." *J. Polym. Eng.* 24 (1-3 SPEC. ISS.): 123–136 (2004).

[29] C. Hopmann, W. Michaeli, *Extrusion Dies for Plastics and Rubber*, 2016. ISBN 9781569906231.

[30] Z. Tadmor, C.G. Gogos, *Principles of Polymer Processing*, 2006. ISBN 0471387703.

[31] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, "An Introduction To Computational Fluid." (1995).

[32] O.S. Carneiro, J.M. Nóbrega, P.J. Oliveira, F.T. Pinho, "Flow balancing in extrusion dies for thermoplastic profiles: Part II: Influence of the Design Strategy." *Int. Polym. Process.* 18 (3): 307–312 (2003).

[33] O.S. Carneiro, J.M. Nóbrega, F.T. Pinho, P.J. Oliveira, "Computer aided rheological design of extrusion dies for profiles." *J. Mater. Process. Technol.* 114 (1): 75–86 (2001).

[34] J.M. Nóbrega, O.S. Carneiro, P.J. Oliveira, F.T. Pinho, "Flow balancing in extrusion dies for thermoplastic profiles: Part I: Automatic design." *Int. Polym. Process.* 18 (3): 298–306 (2003).

[35] I. Szarvasy, J. Sienz, J.F.T. Pittman, E. Hinton, "Computer Aided Optimisation of Profile Extrusion Dies." *Int. Polym. Process.* 15 (1): 28–39 (2000).

[36] R. Kannabiran, "APPLICATION OF FLOW BEHAVIOR TO DESIGN OF RUBBER EXTRUSION DIES." *Rubber Chem. Technol.* 59 (1): 142–154 (1986).

[37] J. Ordieres, L.M. LÓpez, A. Bello, A. García, "Intelligent methods helping the design of a manufacturing system for die extrusion rubbers." *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* (November 2014): 173–180 (2003).

[38] E. Mitsoulis, "Three-dimensional non-Newtonian computations of extrudate swell with the finite element method." *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 180 (3–4): 333–344 (1999).

[39] Y. Mu, G. Zhao, X. Wu, J. Zhai, "Finite-element simulation of polymer flow and extrudate swell

through hollow profile extrusion die with the multimode differential viscoelastic model." *Adv. Polym. Technol.* 32 (SUPPL.1): (2013).

[40] W. Michaeli, *Extrusion Dies*, Hanser, New York, 1984.

[41] J.F.T. Pittman, "Computer-aided design and optimization of profile extrusion dies for thermoplastics and rubber: A review." *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.* 225 (4): 280–321 (2011).

[42] W.S. Lee, H.Y. Ho, "Experimental study on extrudate swell and die geometry of profile extrusion." *Polym. Eng. Sci.* 40 (5): 1085–1094 (2000).

[43] S.R. Vaddiraju, M. Kostic, L. Reifschneider, A. Pla-Dalmau, V. Rykalin, A. Bross, "Extrusion Simulation and Experimental Validation To Optimize," in: 2004.

[44] R.I. Tanner, "A theory of die-swell." *J. Polym. Sci. Part A-2 Polym. Phys.* 8 (12): 2067–2078 (1970).

[45] A. Bankar, J.P. Rath, Unnikrishnan, T. Thomas, "Extrusion Simulation of Tire Components Using HyperXtrude," in: *Altair Technol. Conf.*, 2013.

[46] J. Harold F. Giles, J. John R.Wagner, I. Eldridge M. Mount, *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, 2005. ISBN 0815514735.

[47] M.J. Stevens, J.A. Covas, *Extruder principles and operation*, Chapman & Hall, 1995. ISBN 9780412635908.

[48] J.L. White, "Part VI Extrusion-2: Dies and Post Die Equipment," in: *Rubber Process. Technol. Mater. Princ.*, 1995.

[49] W.S. Moon, S. Jose, Calif., Method for controlling the thickness or weight of extruded stock, 1943.

[50] Starret-Bytewise, *Dimensional Variations in Tire Tread Extrusions*, 2013.

[51] G. Nijman, *Harburg-Freudenberger Maschinenbau GmbH Relaxed extrusion : A very important precondition for high quality treads* ., 2017.

[52] R. Gonçalves, "Correlação entre o perfil de pisos medidos com perfilómetros online na zona a quente e a frio," FEUP, 2018.

[53] P.S. Johnson, *Rubber processing : an introduction*, Hanser, 2001. ISBN 9783446215788.

[54] A.L. Kelly, E.C. Brown, K. Howell, P.D. Coates, "Melt temperature field measurements in extrusion using thermocouple meshes." *Plast. Rubber Compos.* 37 (2–4): 151–157 (2008).

[55] J.R. Wagner, E.M. Mount, H.F. Giles, "Part I: Single Screw Extrusion," in: *Extrus. Defin. Process. Guid. Handb.*, 2013. ISBN 978-0-8155-1473-2.

[56] D. V. Rosato, *Extruding Plastics: A Practical processing handbook*, 1998. ISBN 9780412828102.

[57] G.. Colbert, "Time uniformity of extrudate melt temperature." *Rubber World*. 4 27–31 (1990).

[58] J.R. Wagner, E. Mount, H. Giles, *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook: Second Edition*, 2013. ISBN 9781437734812.

[59] C. Abeykoon, P.J. Martin, A.L. Kelly, E.C. Brown, "A review and evaluation of melt temperature sensors for polymer extrusion." *Sensors Actuators, A Phys.* (2012).

[60] J. R.Wagner, E. M.Mount, H.F. Giles, "Single Screw Extruder: Equipment," in: *Extrus. Defin. Process. Guid. Handb.*, 2nd ed., Plastics Design Library, 2014. ISBN 9781482278859.

[61] V. Schoppner, E. Enns, K. Anger, E. Giese, "No Title." *SPE-ANTEC Tech Pap.* 228 (2008).

[62] E.C. Brown, A.L. Kelly, P.D. Coates, "No Title." *SPE-ANTEC Tech Pap.* 77 (2003).

[63] E.C. Brown, A.L. Kelly, P.D. Coates, "No Title." *SPE-ANTEC Tech Pap.* 183 (2004).

[64] A.L. Kelly, E.C. Brown, P.D. Coates, "No Title." *SPE-ANTEC Tech Pap.* 291 (2005).

[65] A.J. Bur, S.C. Roth, "Fluorescence temperature measurements: Methodology for applications to process monitoring." *Polym. Eng. Sci.* 44 (5): 898–908 (2004).

[66] E.C. Brown, P. Olley, P.D. Coates, "In line melt temperature measurement during real time ultrasound monitoring of single screw extrusion." *Plast. Rubber Compos. Process. Appl.* 29 (1): 3–13 (2000).

[67] S. Brockhaus, V. Schöppner, "Influence of barrel and screw heating in rubber extrusion." *Int. Polym. Sci. Technol.* 42 (10): 1–6 (2015).

[68] H. Nishizawa, "Heat Controls and Rubber Flow Behaviour in Screw of Extruder and Injection Machine and the Problems Occurring in these Processes." *Int. Polym. Sci. Technol.* 43 (4): 41–50 (2016).

[69] A. Rajkumar, L.L. Ferrás, C. Fernandes, O.S. Carneiro, A. Sacramento, J.M. Nóbrega, "Differential Heating as a Strategy for Controlling the Flow Distribution in Profile Extrusion Dies." *OpenFOAM®*. 109–120 (2019).

[70] S. Preparation, C. Black, C.B. Industries, S.D. Viscometer, DIN 1646-04 - Viscosity, stress relaxation and pre-vulcanization characteristics (Mooney viscosimeter)- 2004-01, 2004.

[71] J.S. Dick, *Basic Rubber Testing: Selecting Methods for a Rubber Test Program*, 2003. ISBN 0803133588.

[72] A. Technologies, *MV 2000 - Mooney Viscometer*, .

[73] S. Paulo, B.B. Guerra, "Avaliação Reológica de Elastômeros e suas Composições." (2004).

[74] MonTech, Solutions | MonTech Rubber Testing Solutions. (Consultado a: 02/07/2020). Disponível em: https://www.rubber-testing.com/solutions.

[75] A. International, F. indexed by mero, Standard Test Method for Rubber-Measurement of Unvulcanized Rheological Properties Using Rotorless Shear Rheometers, Available in: www.astm.org.

[76] A. Technologies, *RPA 2000-Rubber Process Analyzer*, .

[77] B.J.S. Dick, "Evolution of RPA test methods for industry." 12–18 (2015).

[78] B.B. Guerra, C.R.G. Furtado, F.M.B. Coutinho, "Avaliação Reológica de Elastômeros e suas Composições." *Polímeros Ciência e Tecnol.* 14 289–294 (2004).

[79] J.S. Dick, "Compound Processing Characteristics and Testing," in: *Rubber Technol. Compd. Test. Perform.*, 2009. ISBN 9781569904657.

[80] J.L. Leblanc, M. Cartault, "Advanced torsional dynamic methods to study the morphology of

uncured filled rubber compounds." *J. Appl. Polym. Sci.* 80 (11): 2093–2104 (2001).

[81] C.L. Rohn, *Analytical polymer rheology : structure-processing-property relationships*, Hanser, 1995. ISBN 3446170340.

[82] Amplitude sweeps :: Anton Paar Wiki. (Consultado a: 02/03/2020). Disponível em: https://wiki.anton-paar.com/en/amplitude-sweeps/.

[83] Frequency sweeps :: Anton Paar Wiki. (Consultado a: 02/03/2020). Disponível em: https://wiki.anton-paar.com/en/frequency-sweeps/.

[84] GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH: Payne-Effect. (Consultado a: 02/04/2020). Disponível em: https://www.goettfert.com/application-knowledge/applications/for-elastomer-testing/payne-effect.html.

[85] WEE-solve GmbH, "Oscillatory test: Amplitude sweep." (2012).

[86] A.Franck, TA Instruments, "Viscoelasticity and dynamic mechanical testing A." *AN004*. 40 (10): 613–621 (1993).

[87] Goettfert, *Dynamic-mechanical and rheological characterization of natural and synthetic rubber compounds*, 2014.

[88] Oscillatory test: Frequency sweep - Homepage WEE-Solve GmbH. (Consultado a: 02/05/2020). Disponível em: http://www.wee-solve.de/en/frequency-sweep.html.

[89] H. A.Barnes, *A handbook of elementary rheology*, 2000. ISBN 0953803201.

[90] L.R. Charles, "Polymer Melts," in: *Anal. Polym. Rheol.*, 1995.

[91] FLIR Tools Thermal Analysis and Reporting (Desktop) | FLIR Systems. (Consultado a: 12/23/2019). Disponível em: https://www.flir.com/products/flir-tools/.

[92] H. Kondo, *Evaluation of rubber processing in unvulcanised rubber*, 2014.

[93] T. Sajjayanukul, P. Saeoui, C. Sirisinha, "Experimental analysis of viscoelastic properties in carbon black-filled natural rubber compounds." *J. Appl. Polym. Sci.* 97 (6): 2197–2203 (2005).

[94] S. Soltani, F.A. Sourki, "Effect of carbon black type on viscous heating, heat build-up, and relaxation behaviour of SBR compounds." *Iran. Polym. J. (English Ed.* 14 (8): 745–751 (2005).

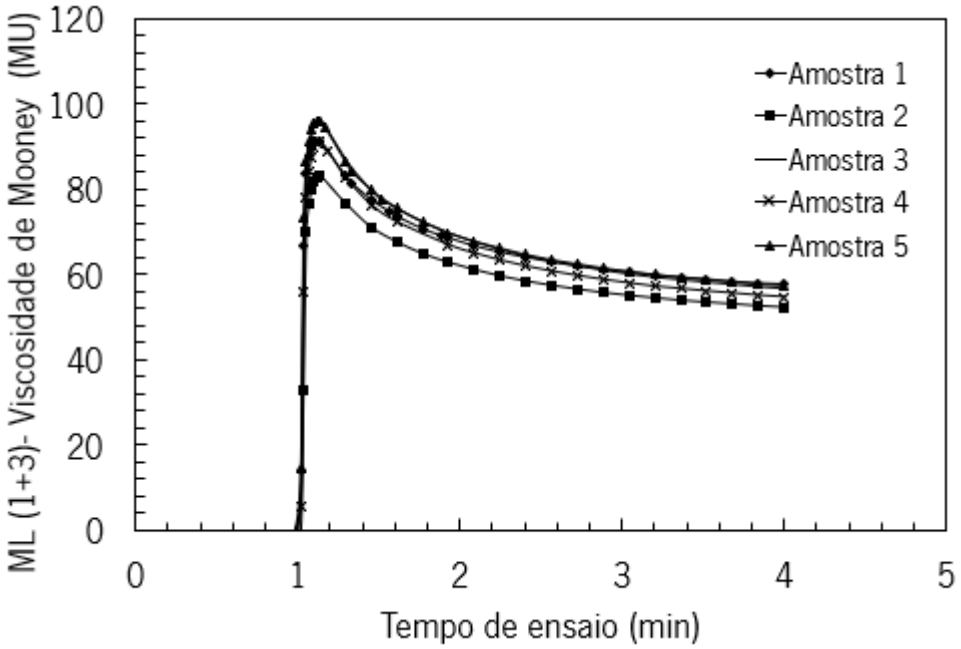
[95] N. Phewthongin, P. Saeoui, C. Sirisinha, "Rheological behavior of CPE/NR blends filled with precipitated silica." *J. Appl. Polym. Sci.* 100 (4): 2565–2571 (2006).

[96] K. Hyun, "A review of nonlinear oscillatory shear tests: Analysis and application of large amplitude oscillatory shear (LAOS)." *Prog. Polym. Sci.* 36 (12): (2011).

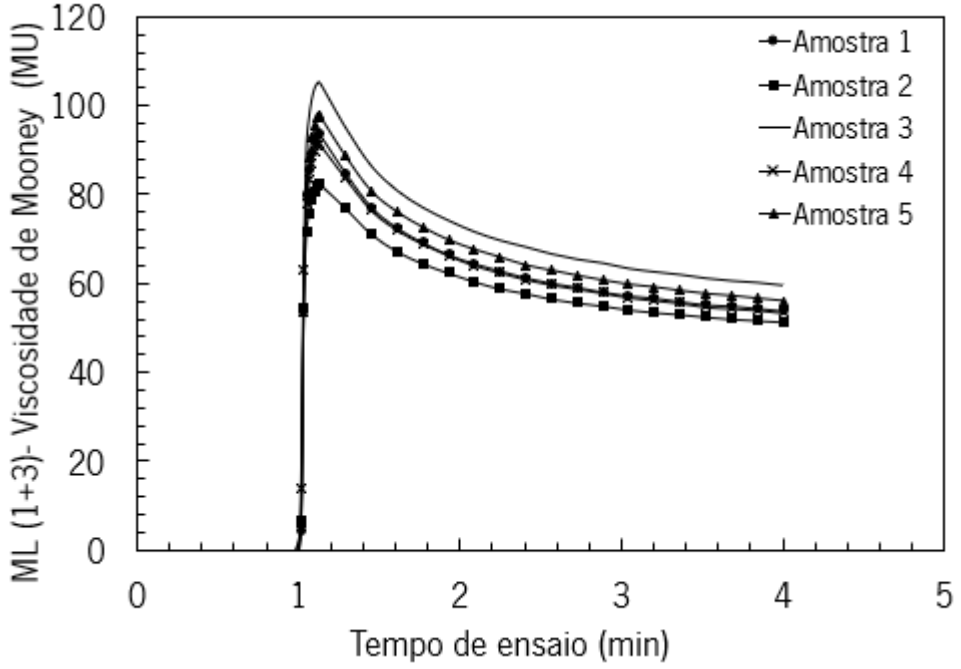
Anexos

Anexo A. Viscosidade de Mooney

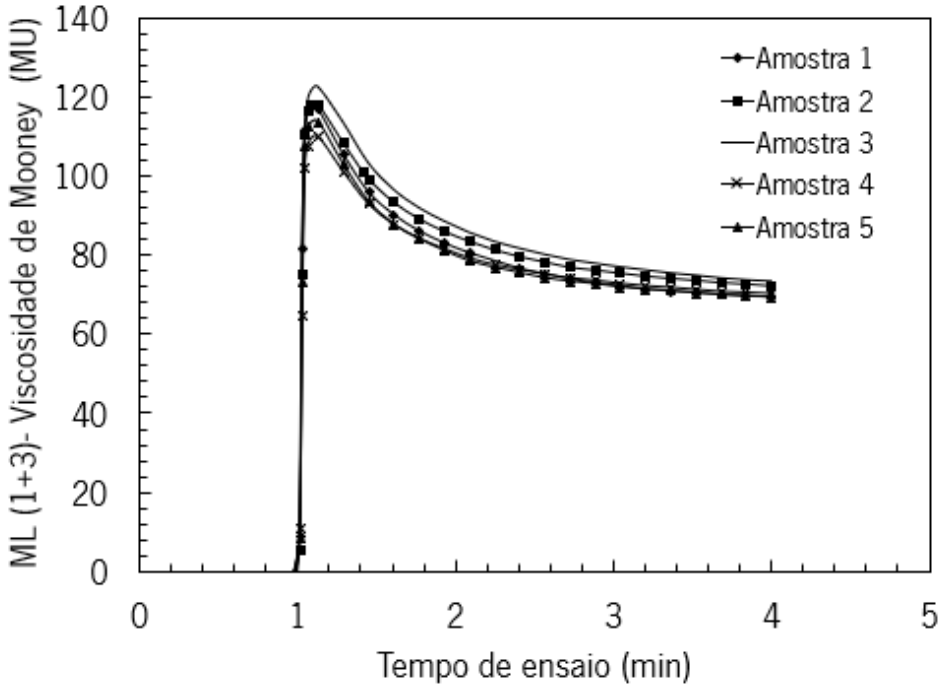
Curvas de viscosidade de Mooney -Composto T14030-Amostras recolhidas antes da extrusão



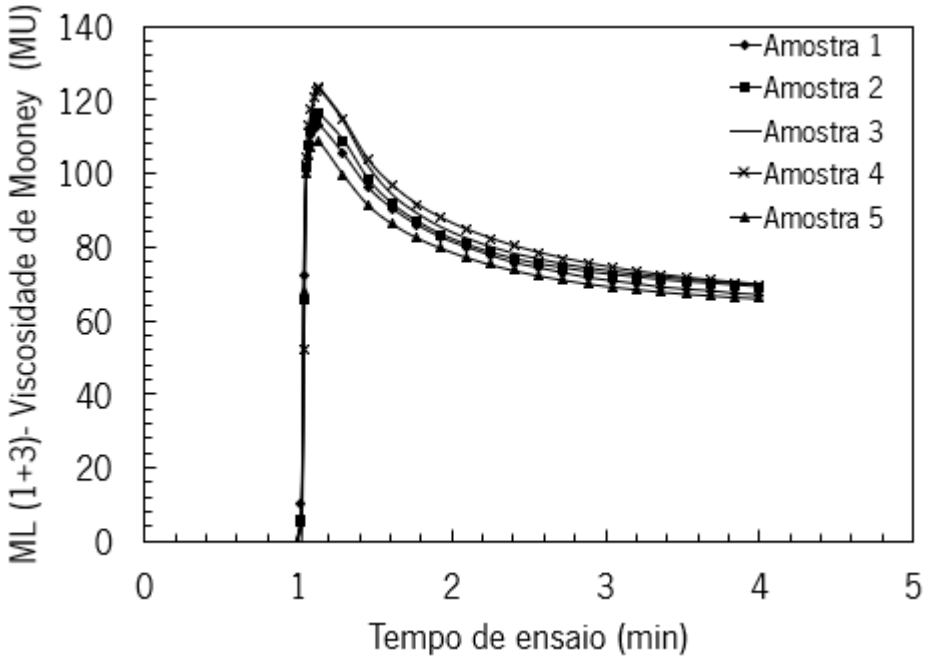
Curvas de viscosidade de Mooney -Composto T14030-Amostras recolhidas depois da extrusão



Curvas de viscosidade de Mooney -Composto T01139-Amostras recolhidas antes da extrusão

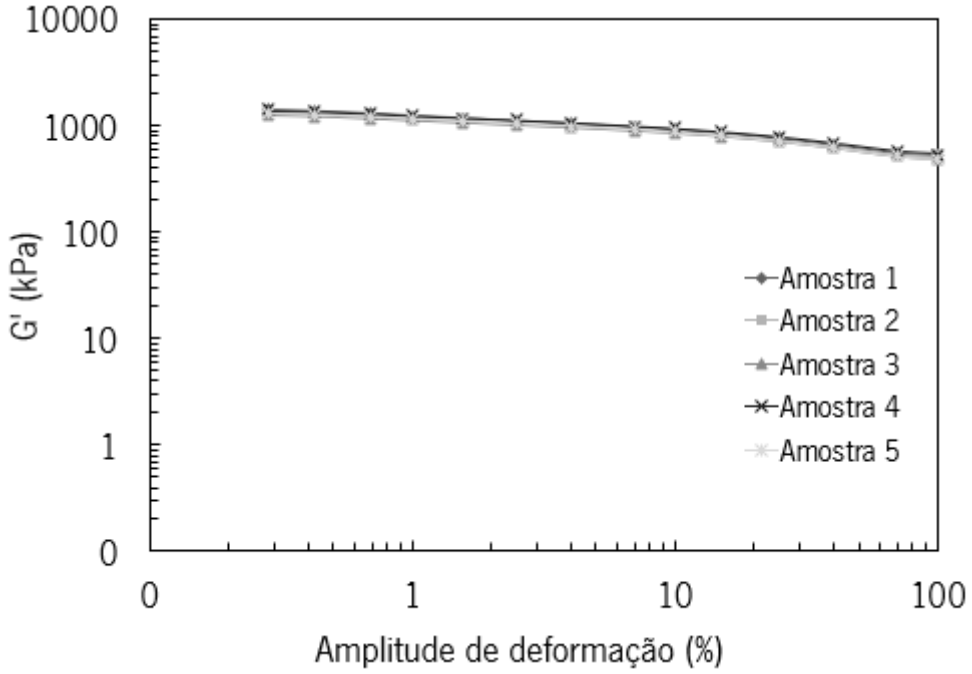


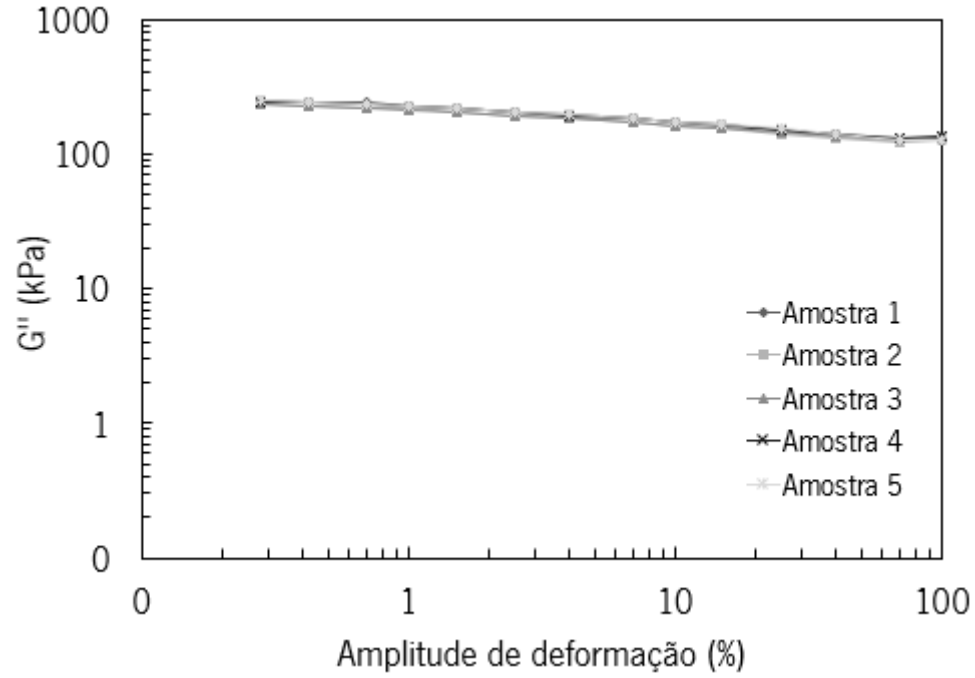
Curvas de viscosidade de Mooney -Composto T01139-Amostras recolhidas depois da extrusão



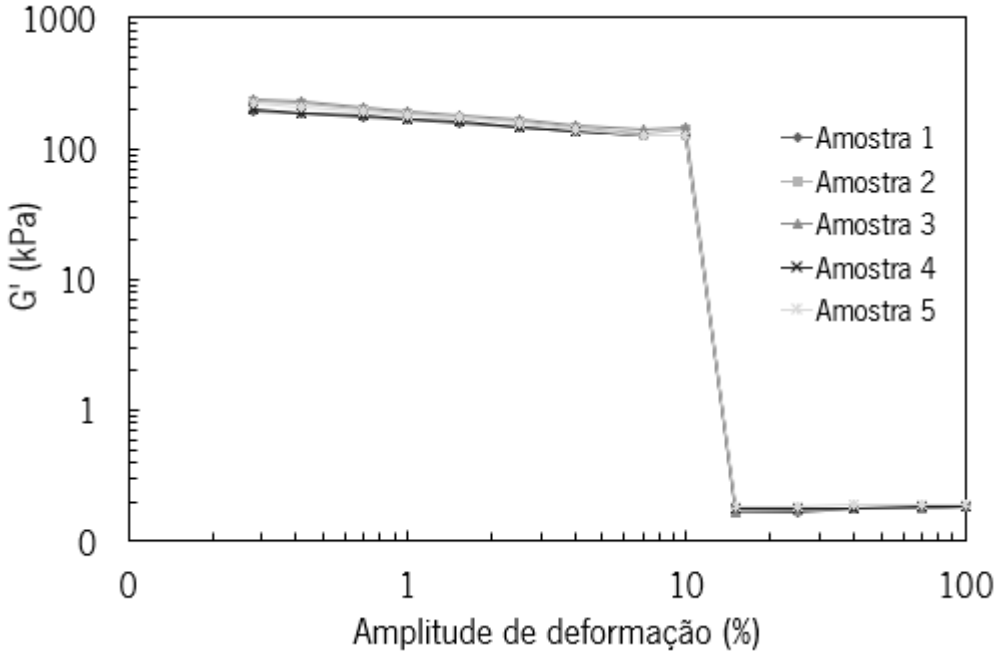
Anexo B. Varrimento em Deformação

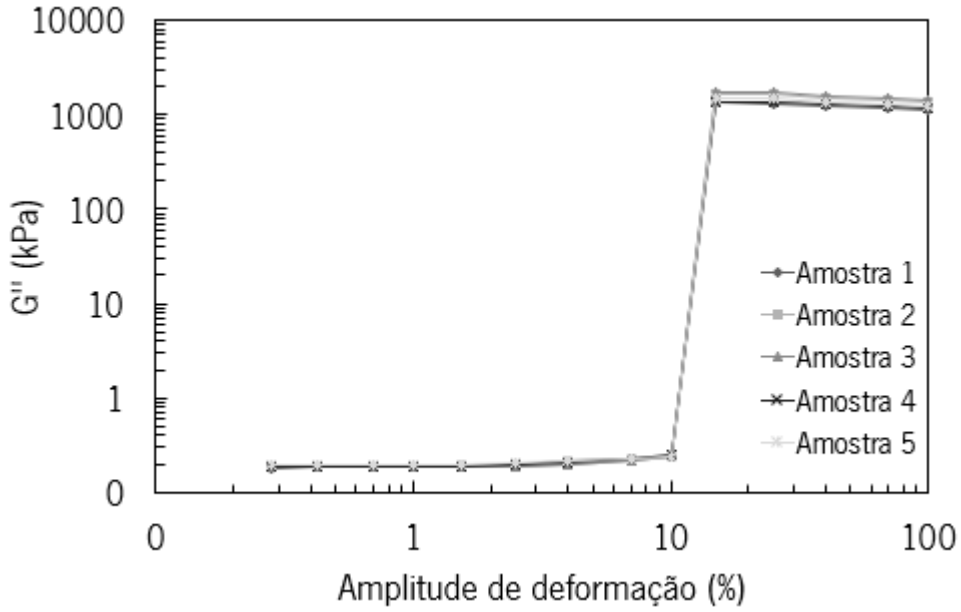
Curvas dos módulos elástico (G') e viscoso (G'') em função da amplitude de deformação- Composto T14030- Amostras recolhidas antes da extrusão



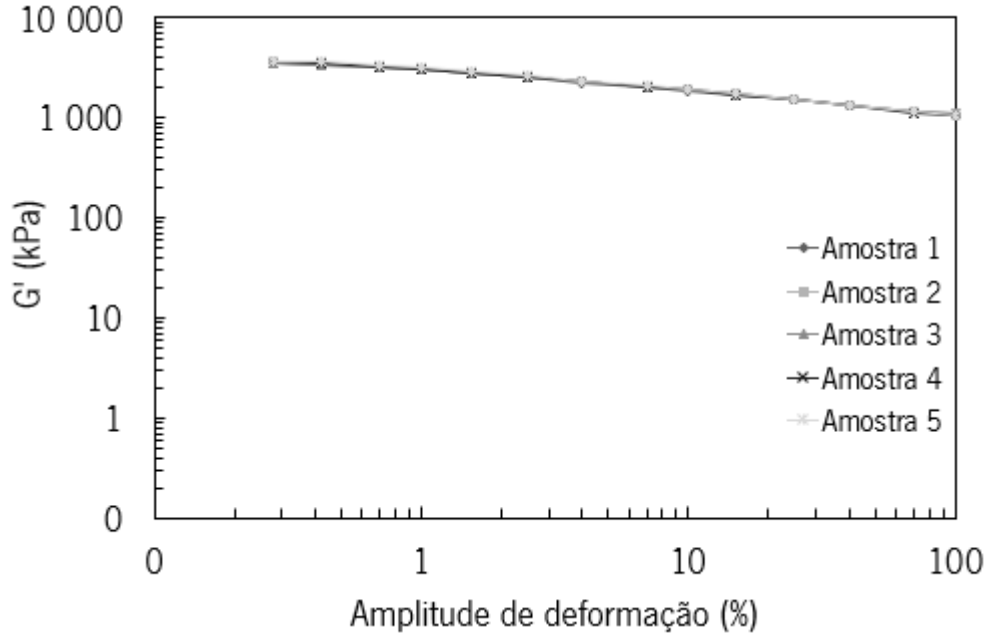


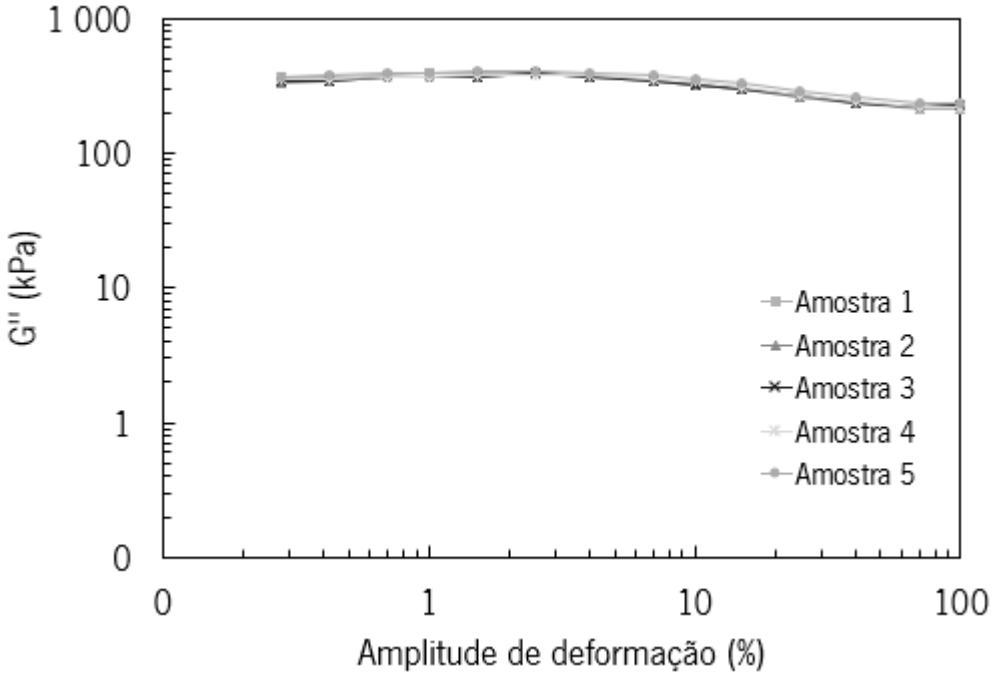
Curvas dos módulos elástico (G') e viscoso (G'') em função da amplitude de deformação- Composto T14030- Amostras recolhidas depois da extrusão



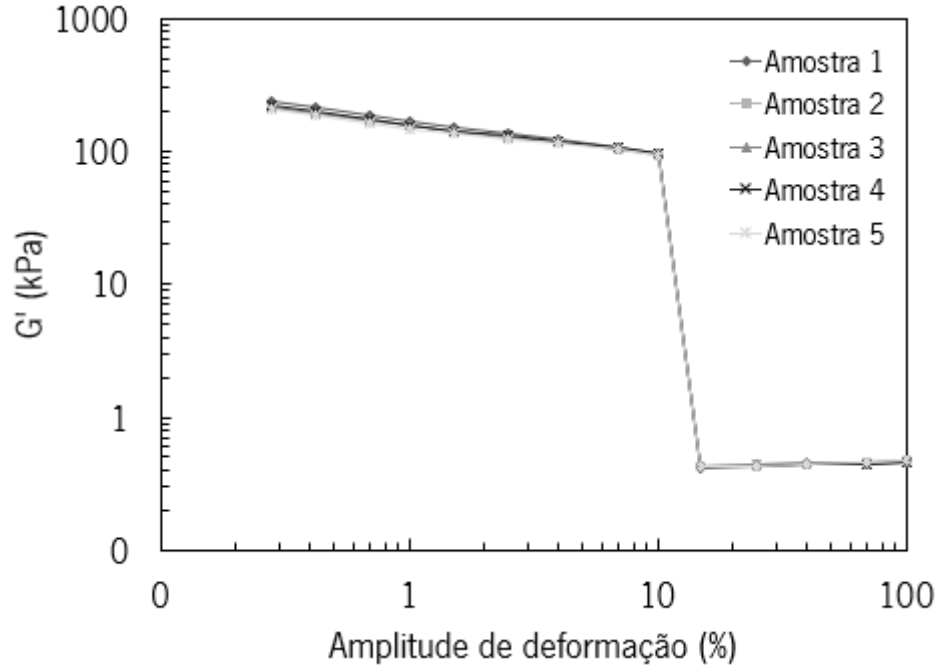


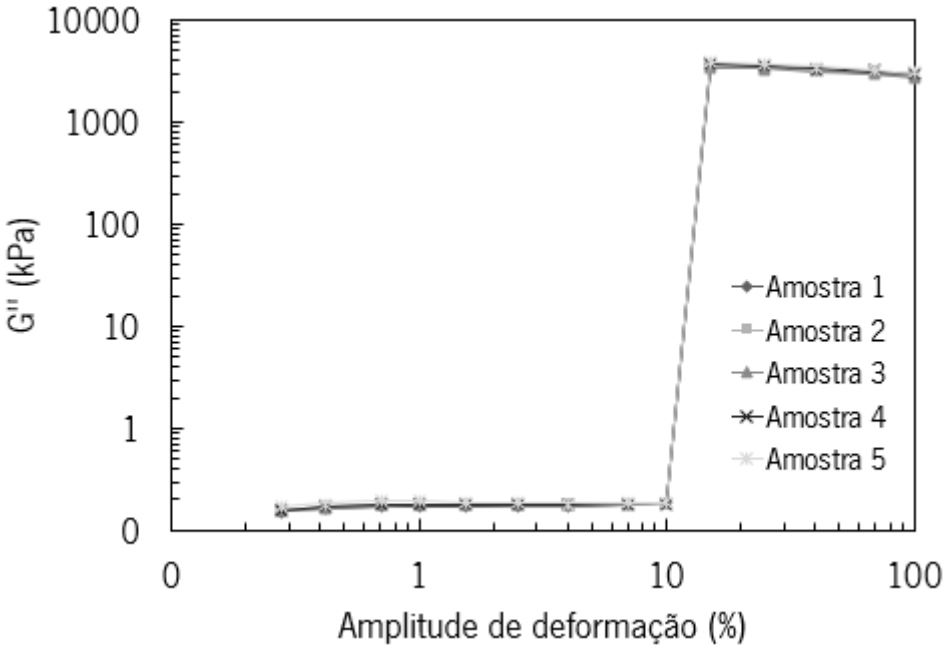
Curvas dos módulos elástico (G') e viscoso (G'') em função da amplitude de deformação- Composto T01139- Amostras recolhidas antes da extrusão





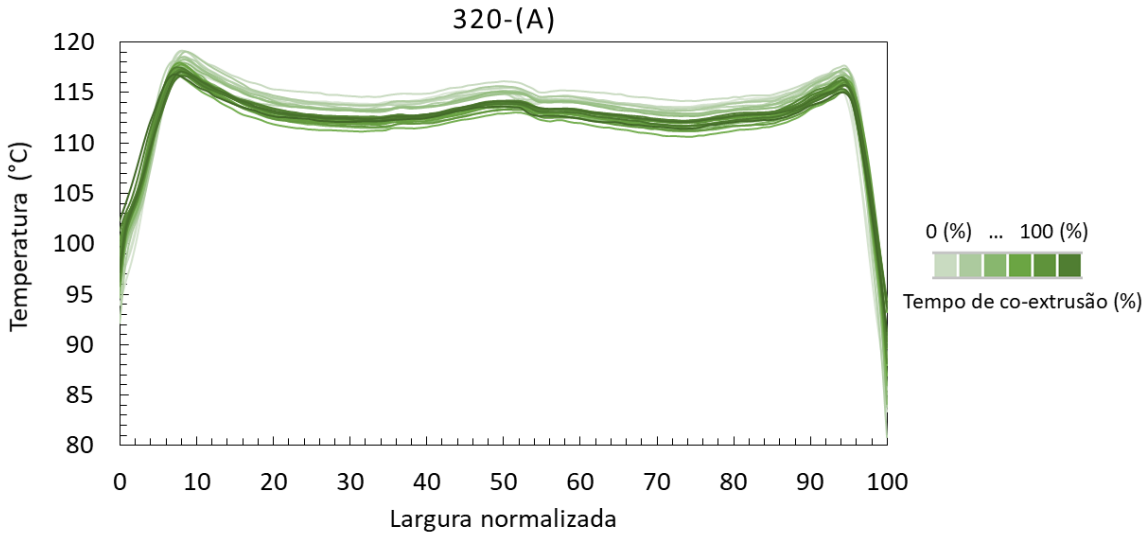
Curvas dos módulos elástico (G') e viscoso (G'') em função da amplitude de deformação- Composto T01139- Amostras recolhidas depois da extrusão

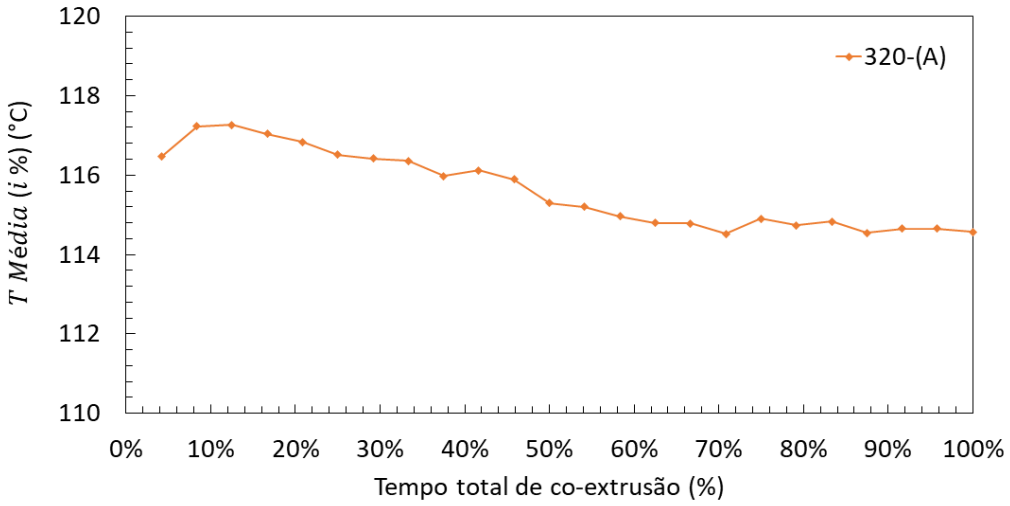


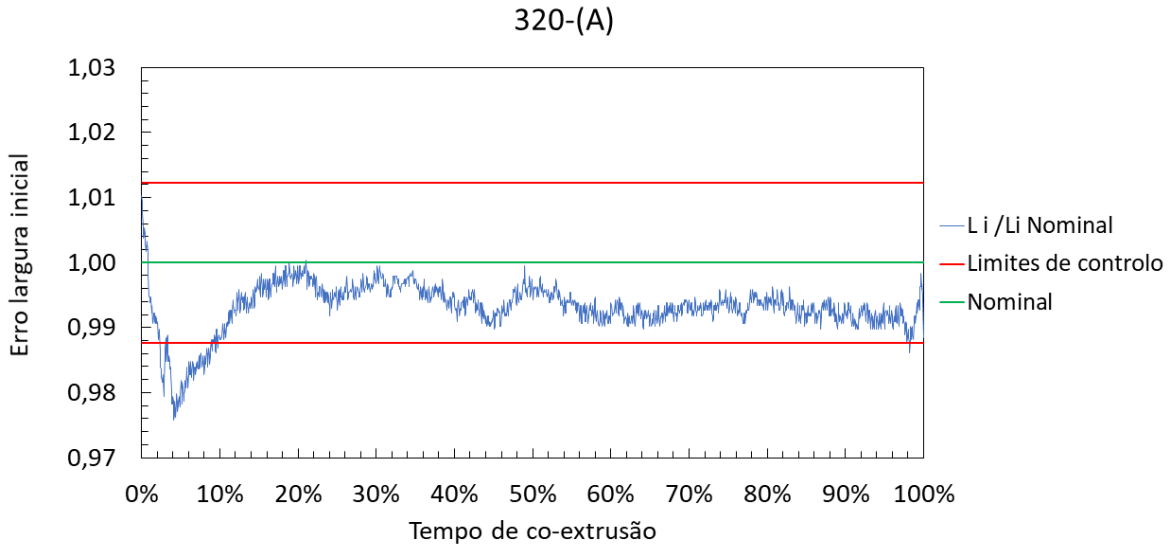


Anexo C. Resultados individuais: Teste B.

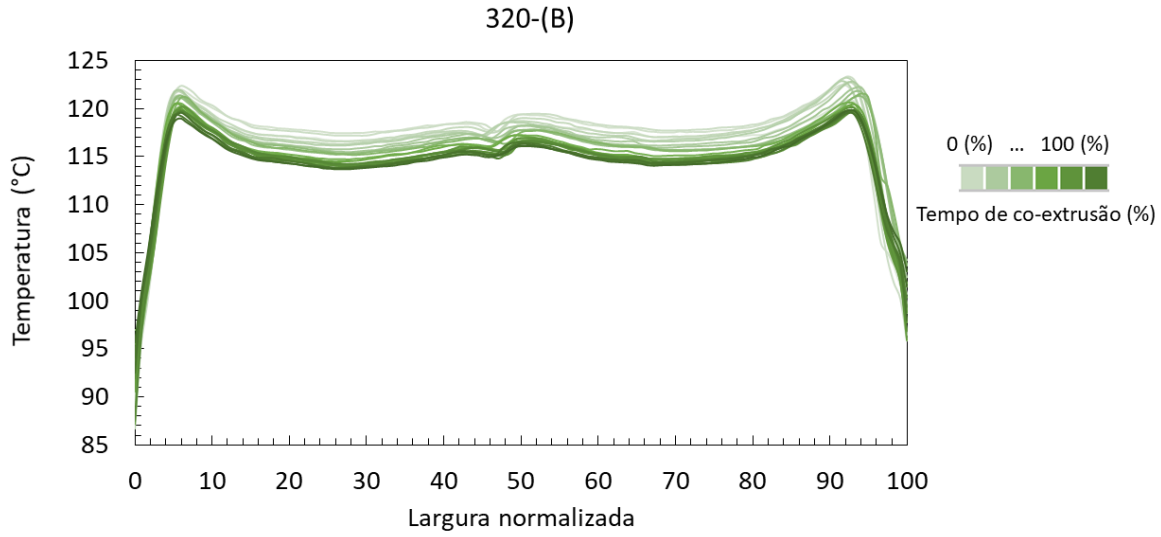
Código 320- Produção A

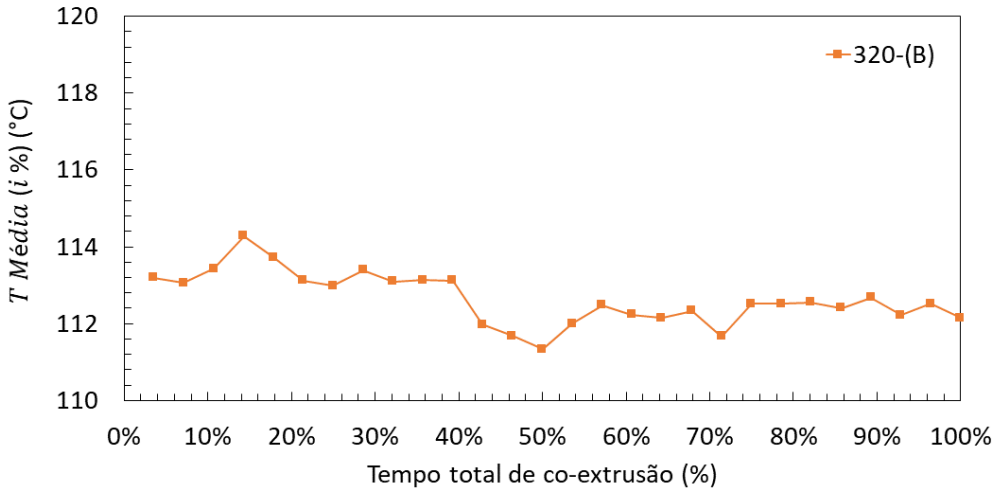


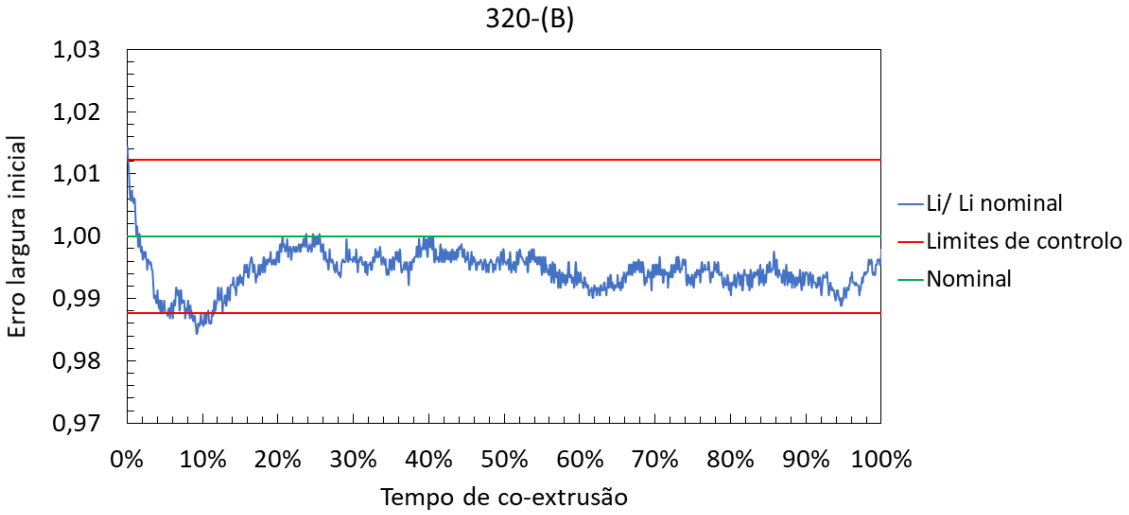




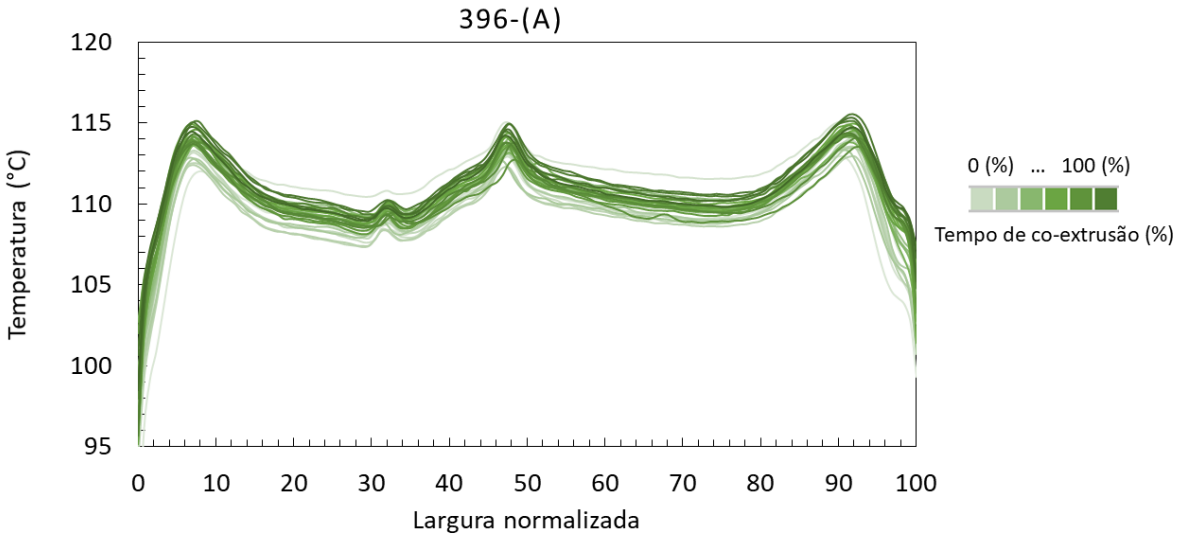
Código 320- Produção B

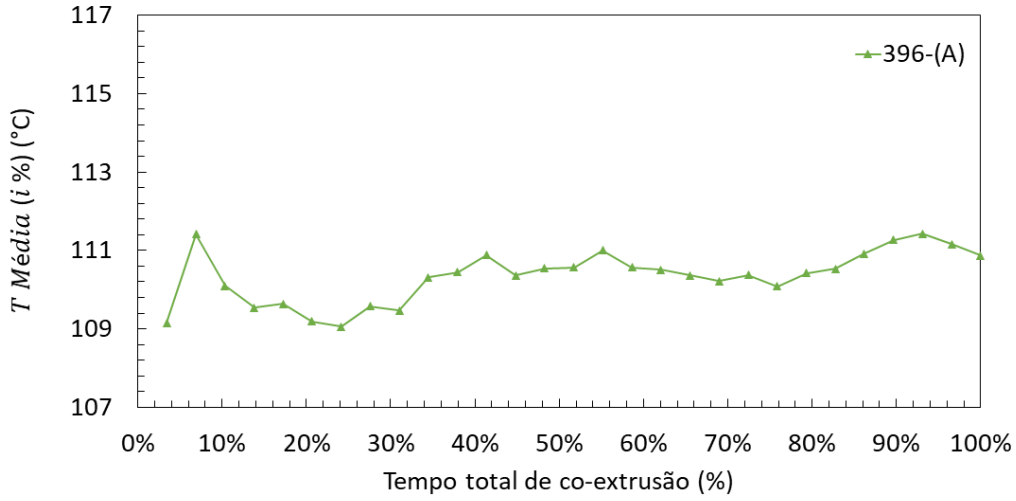


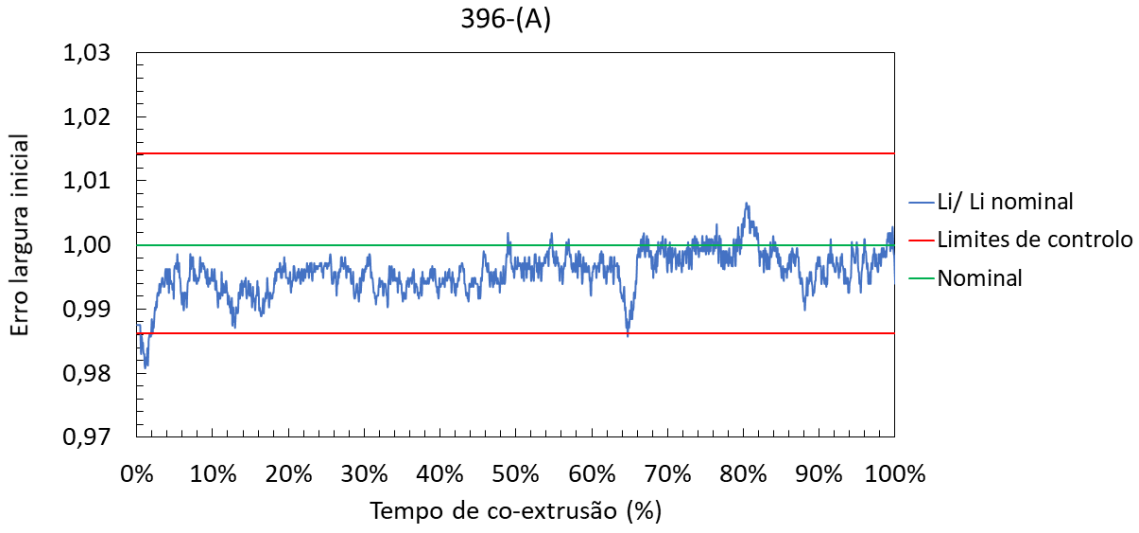




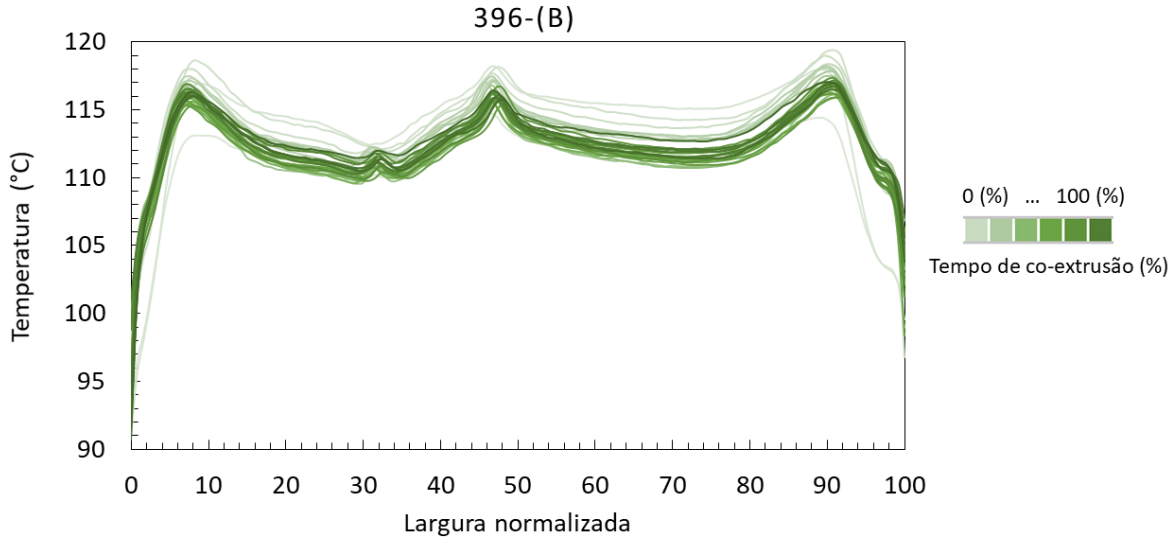
Código 396- Produção A

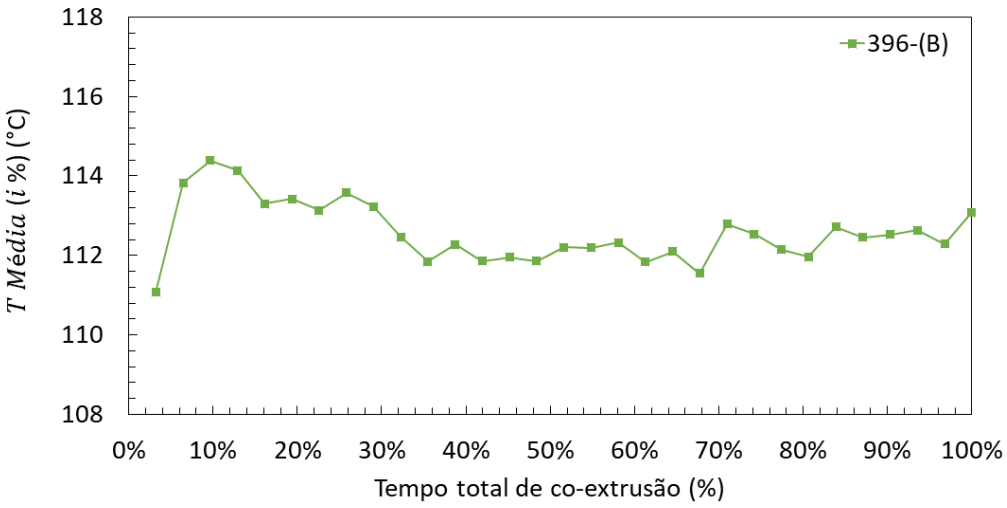


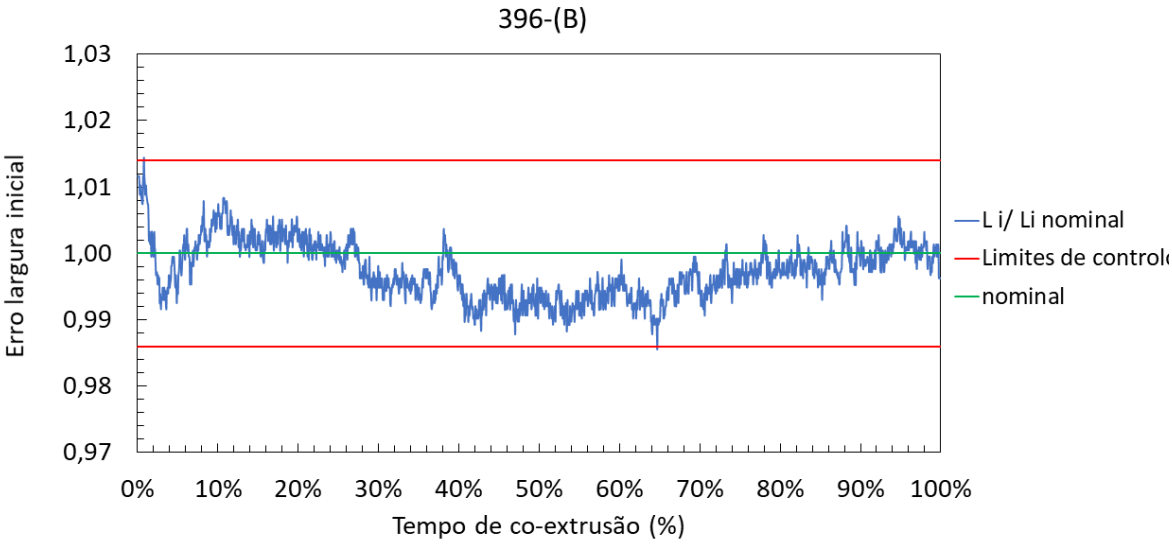




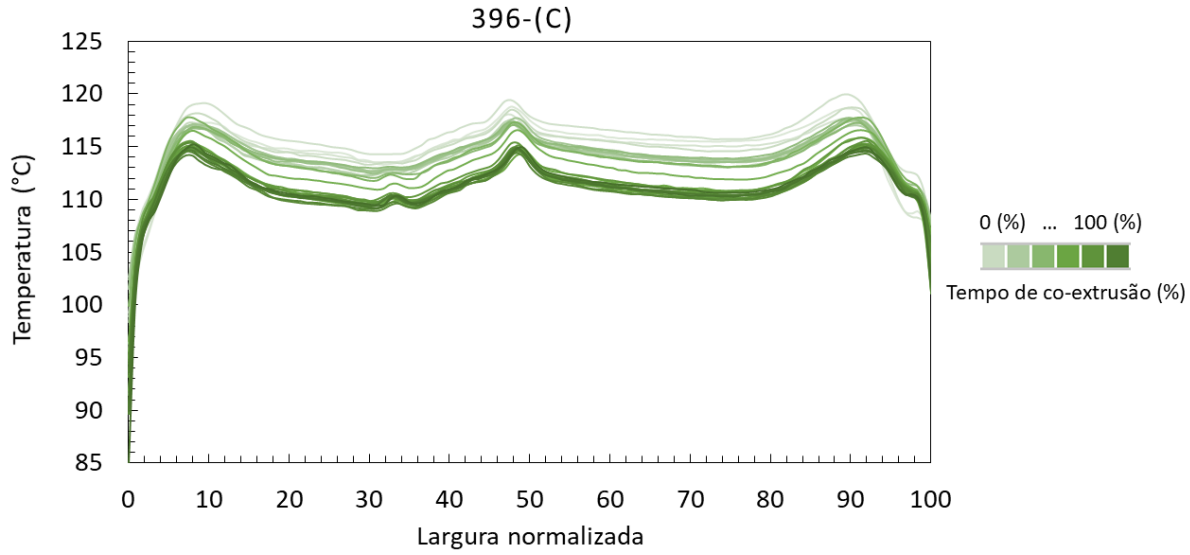
Código 396- Produção B

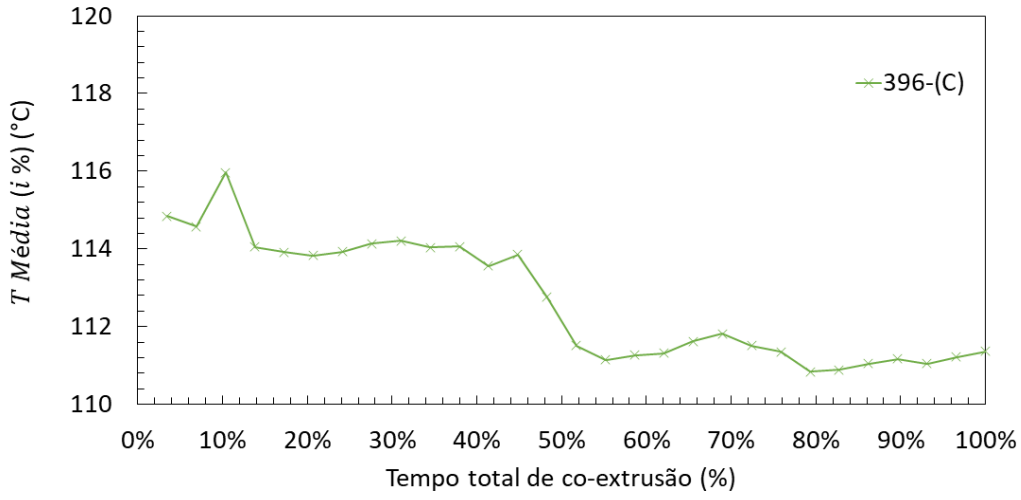


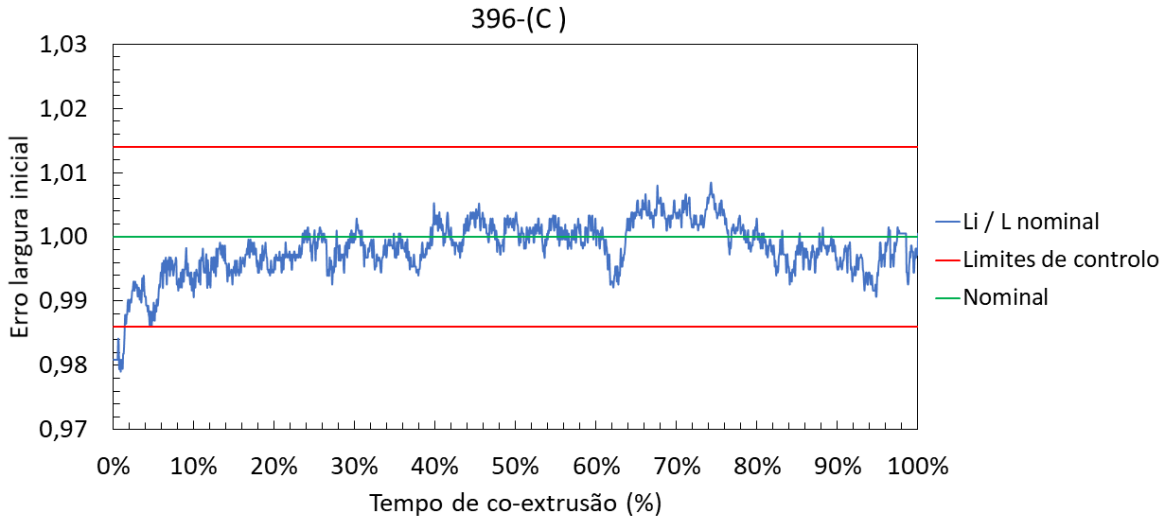




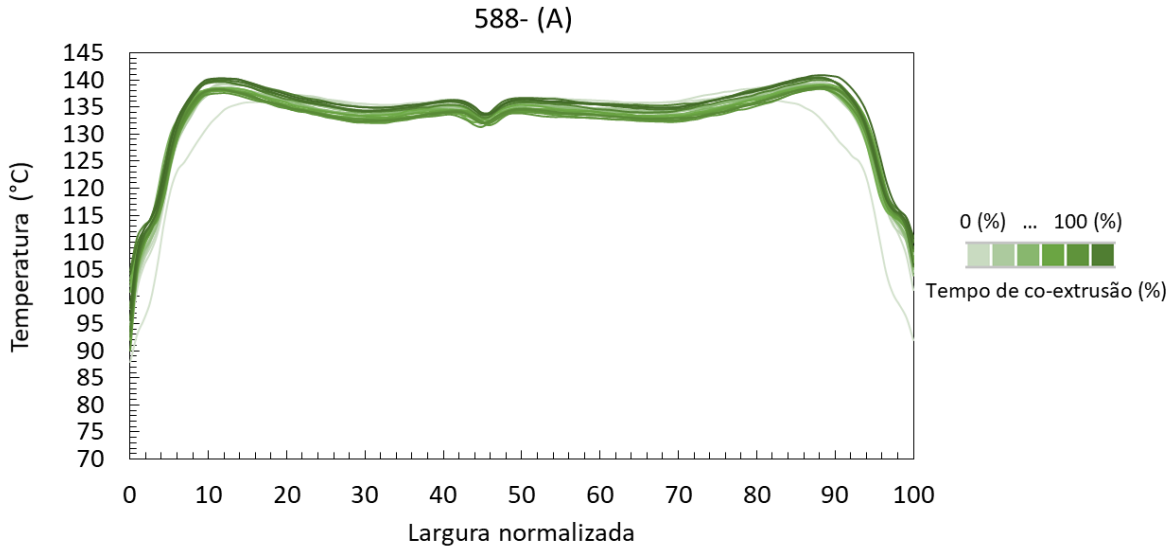
Código 396- Produção C

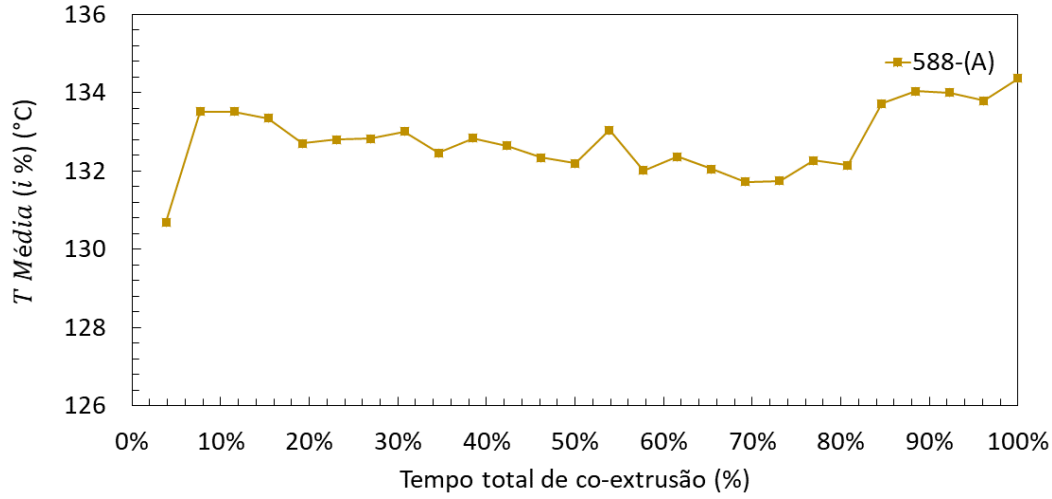


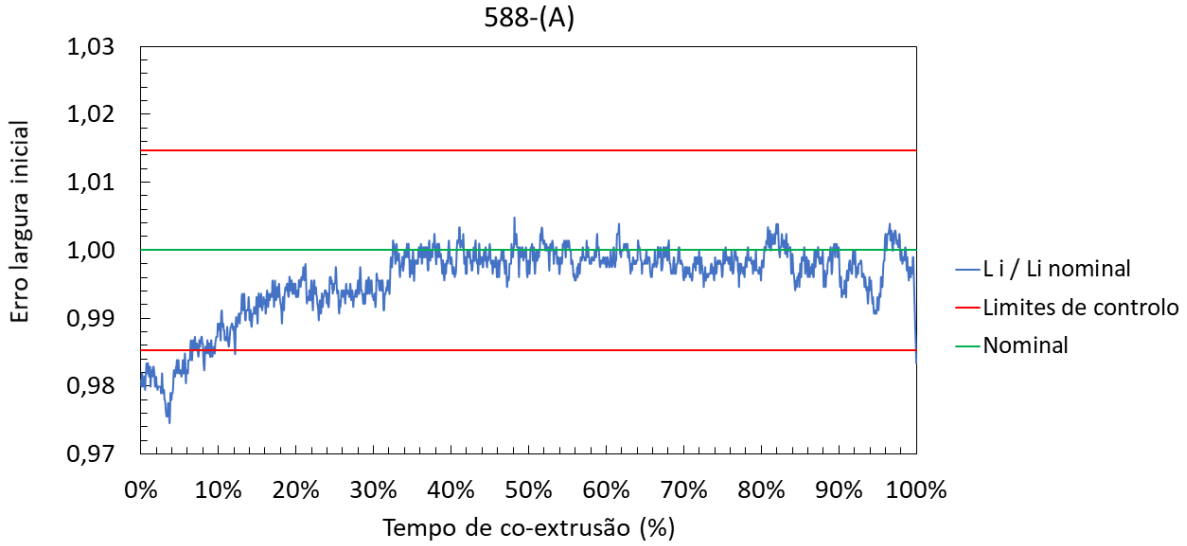




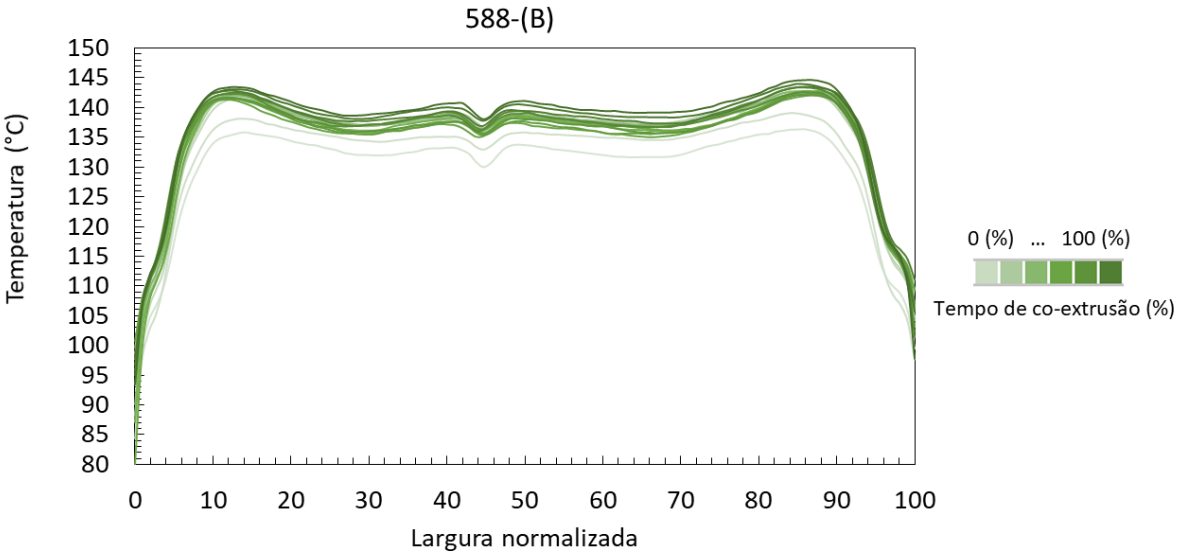
Código 588- Produção A

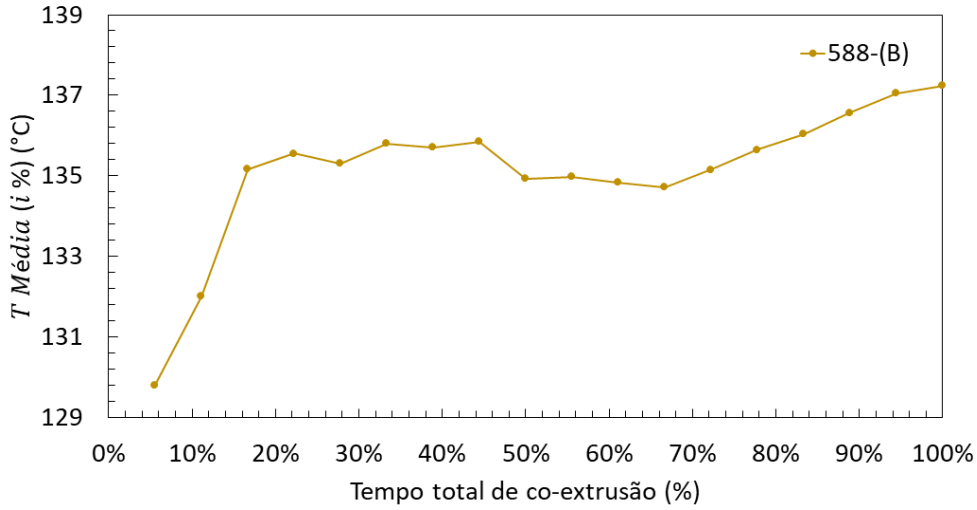


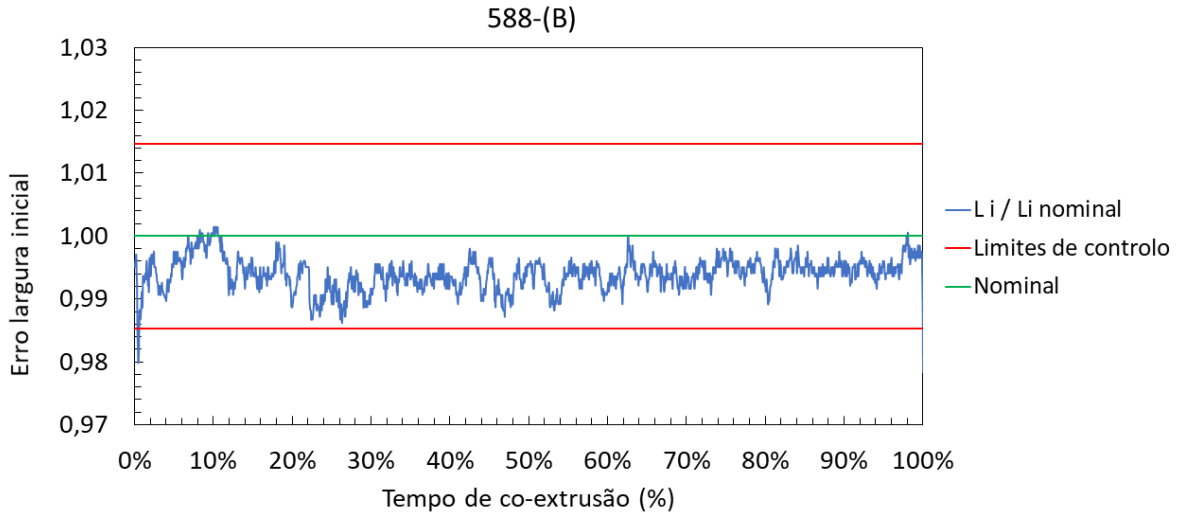




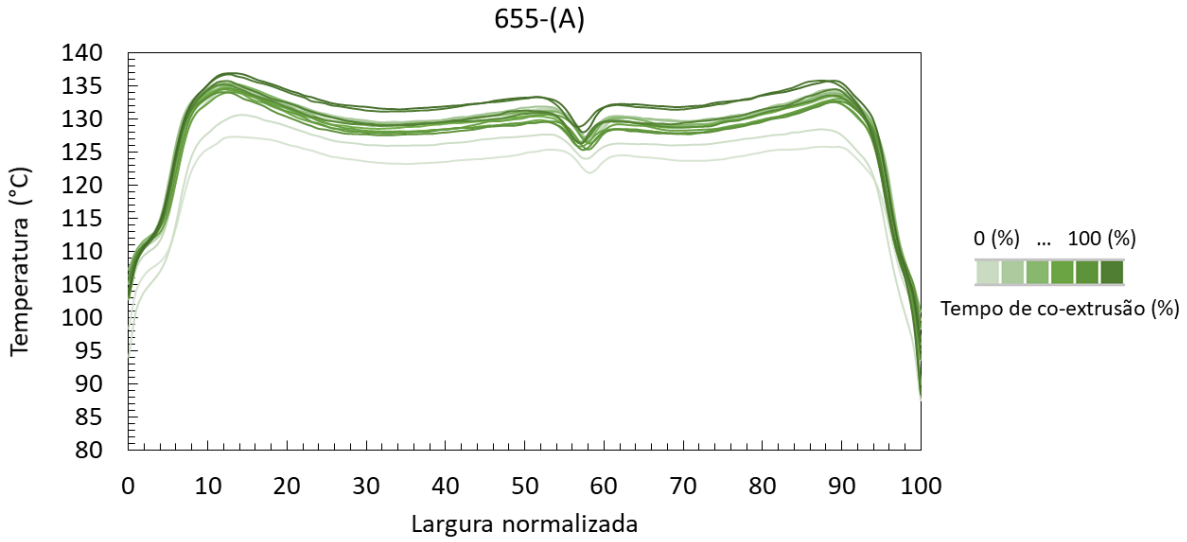
Código 588- Produção B

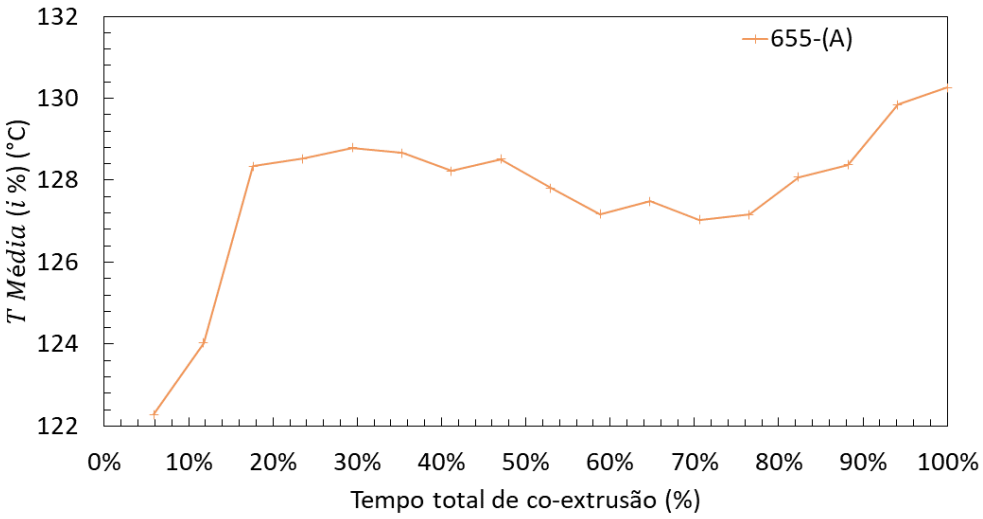


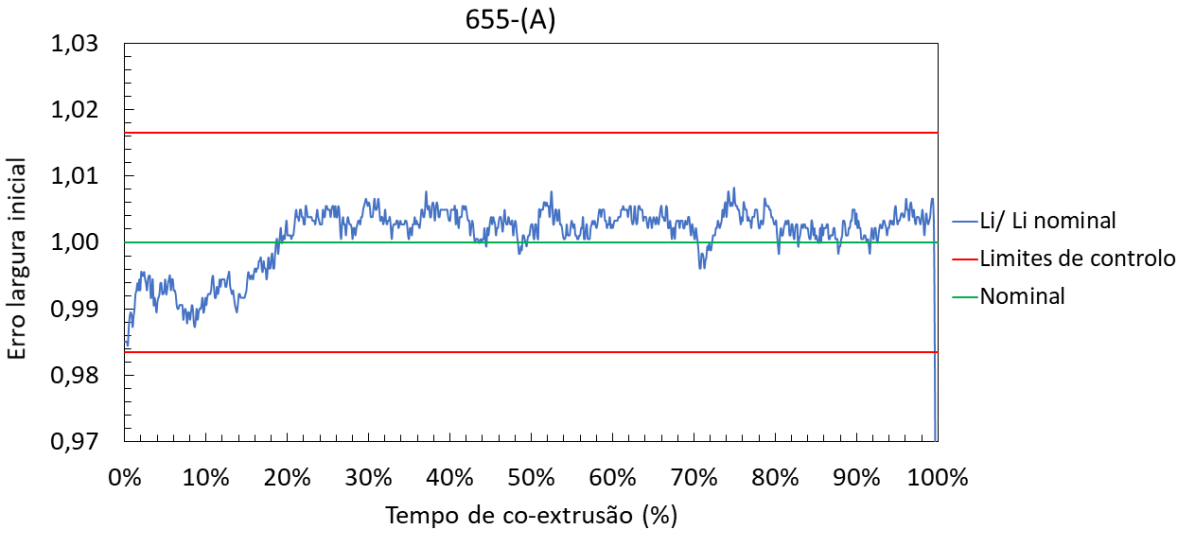




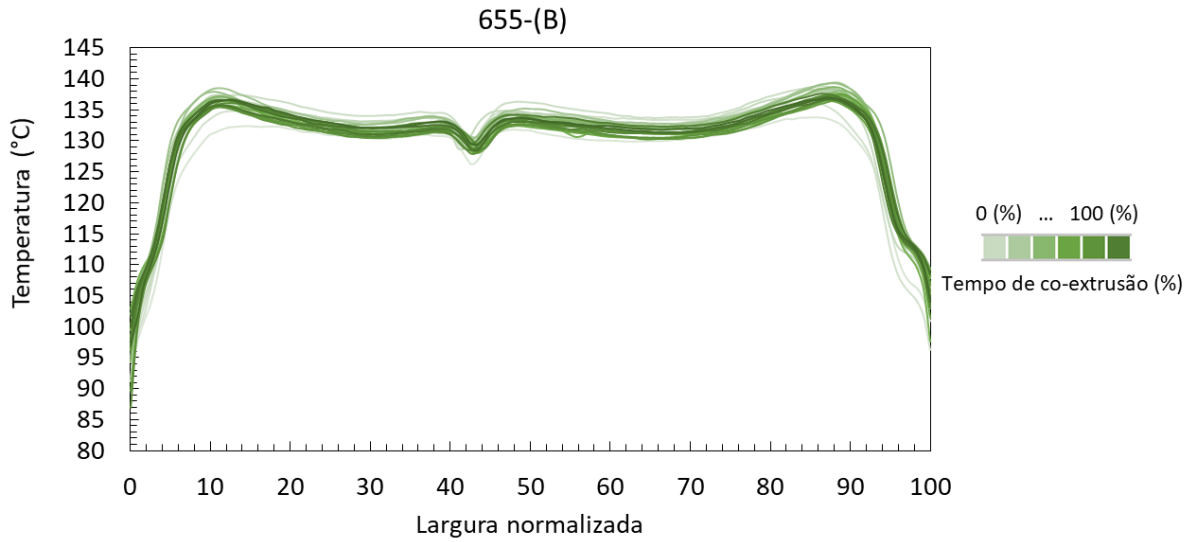
Código 655- Produção A

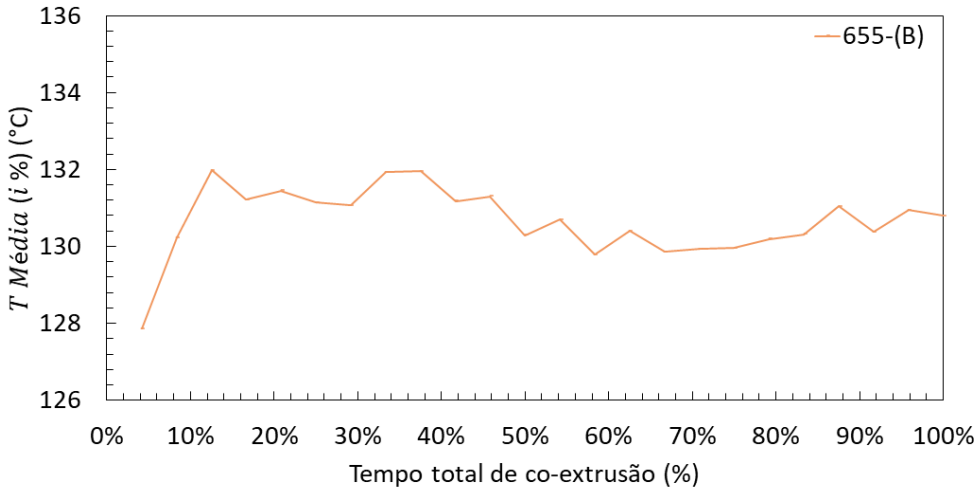


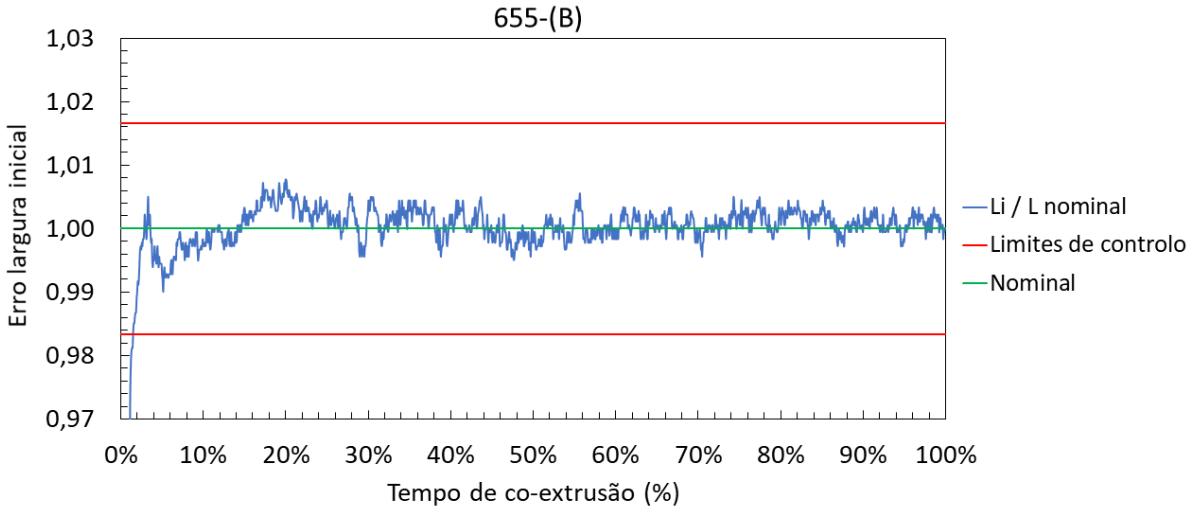




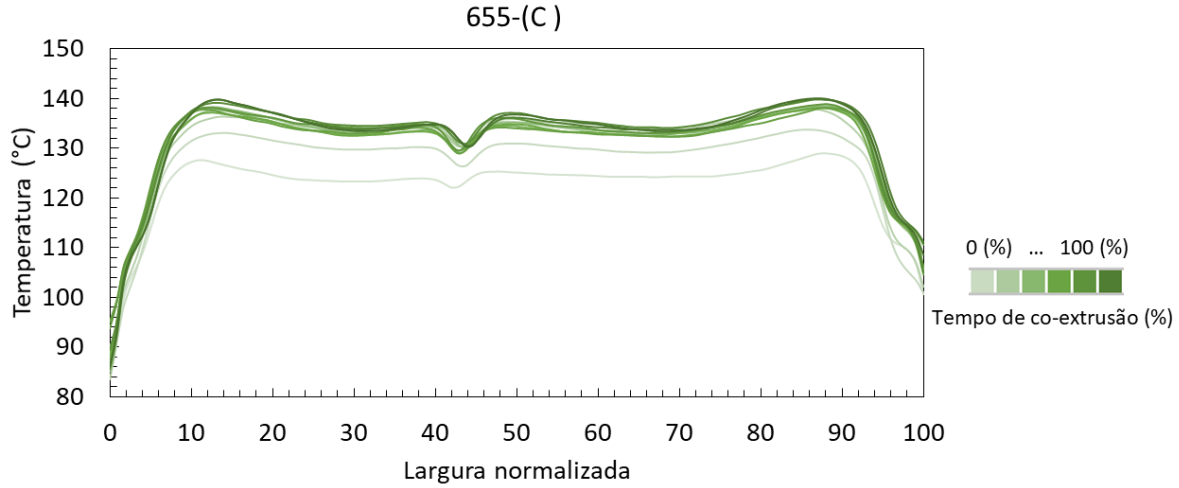
Código 655- Produção B

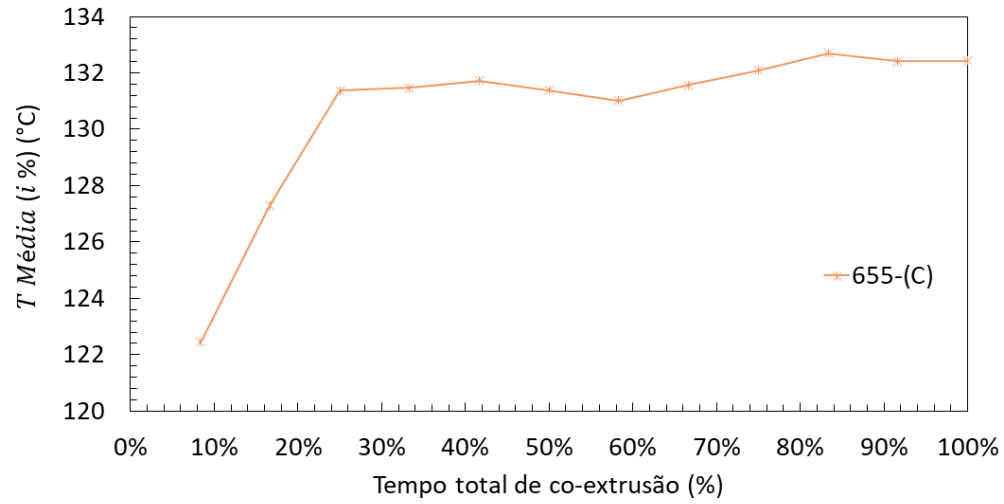


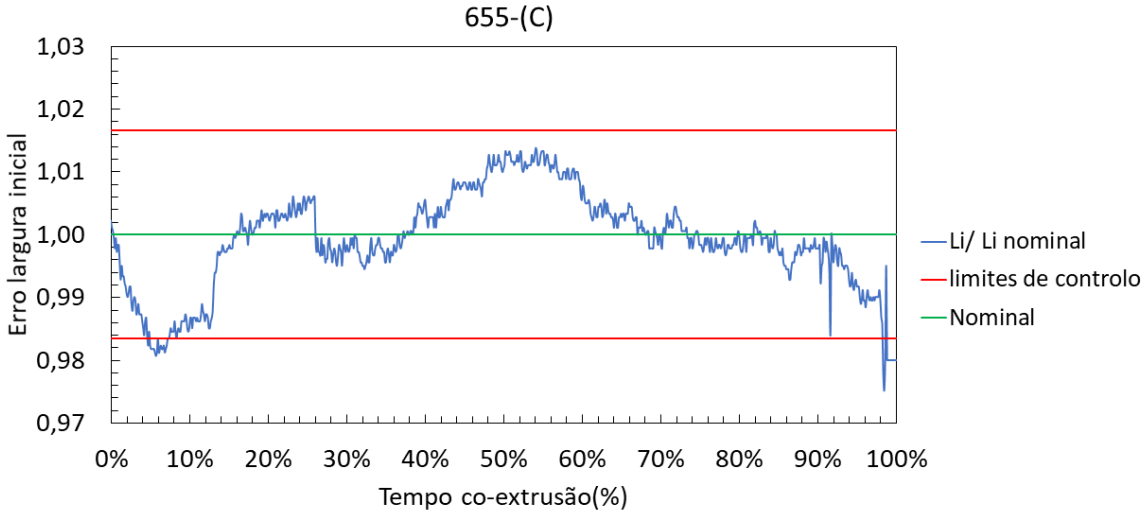




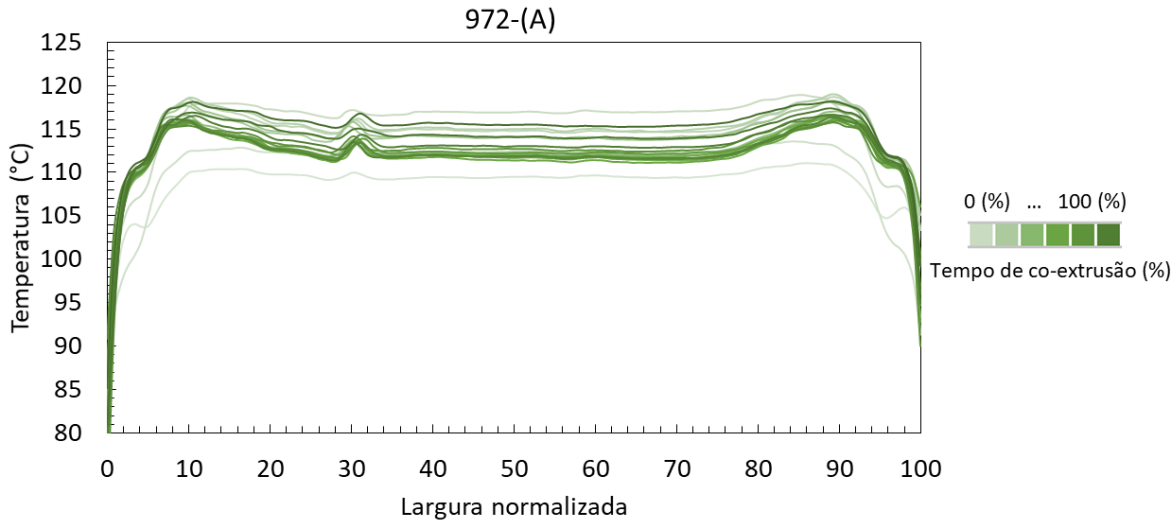
Código 655- Produção C

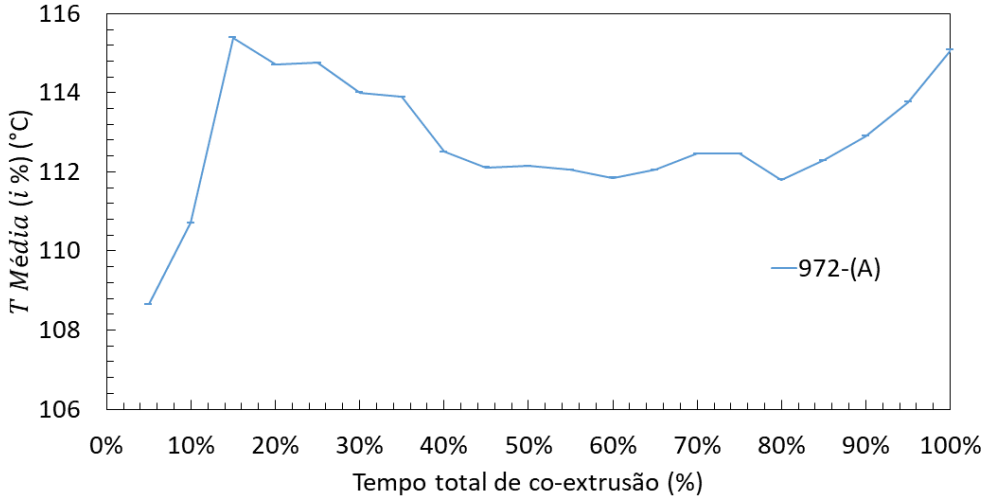


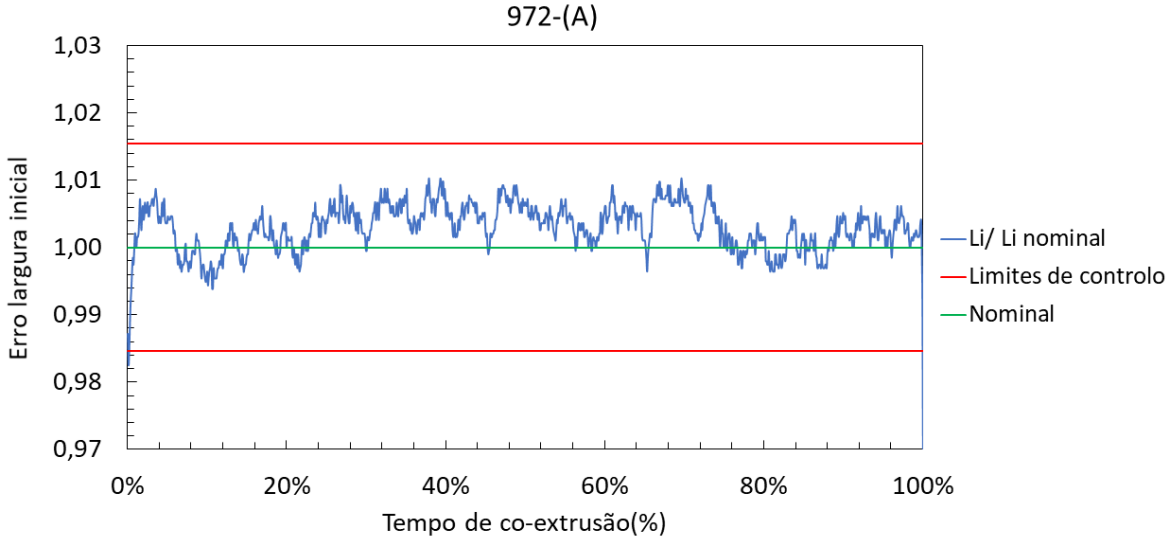




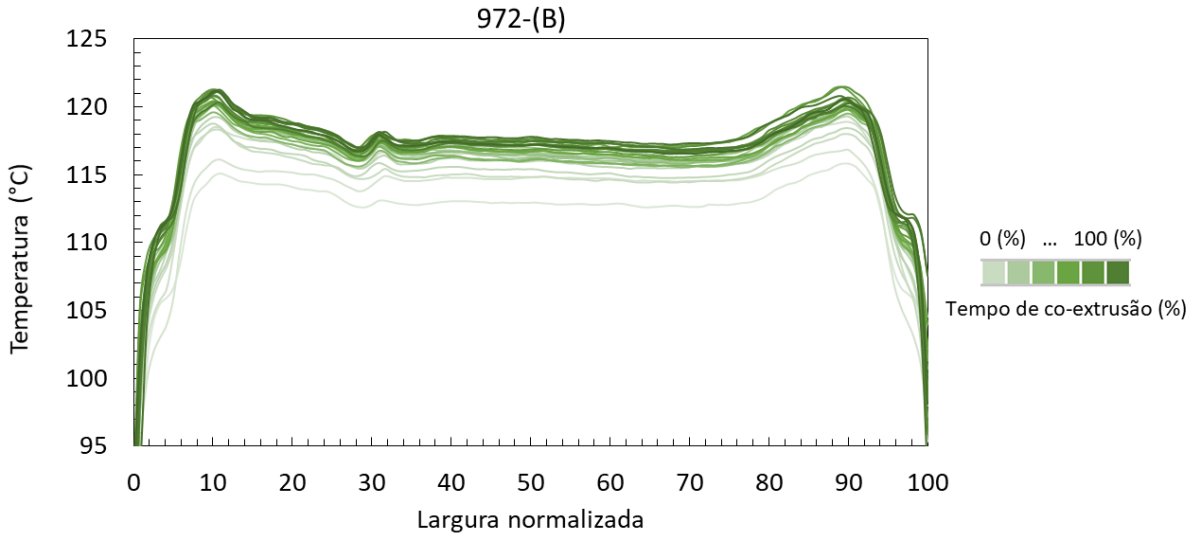
Código 972- Produção A

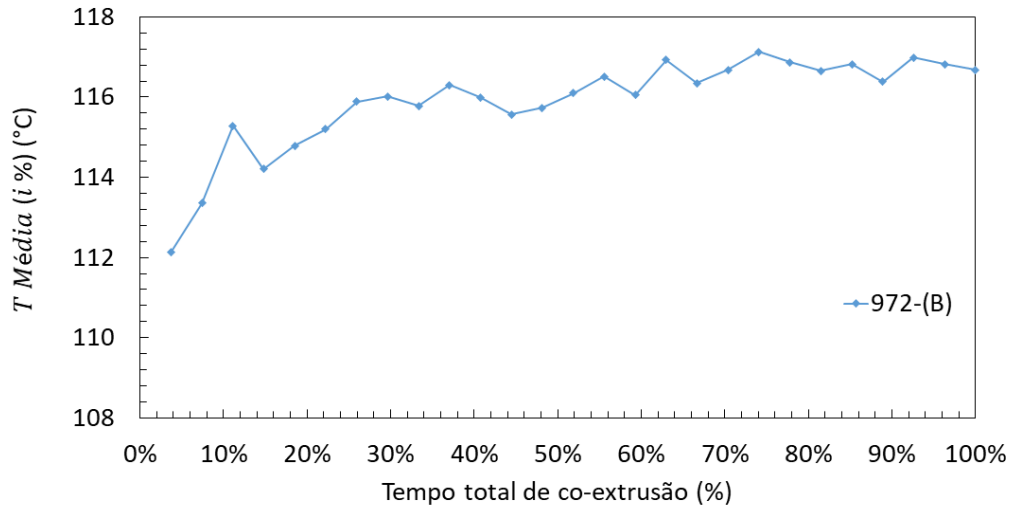


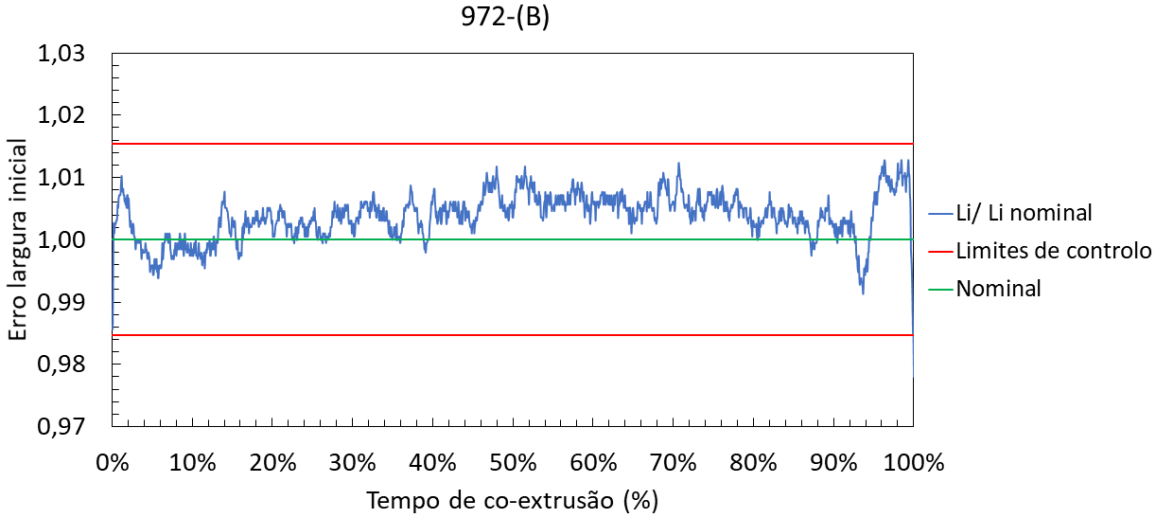




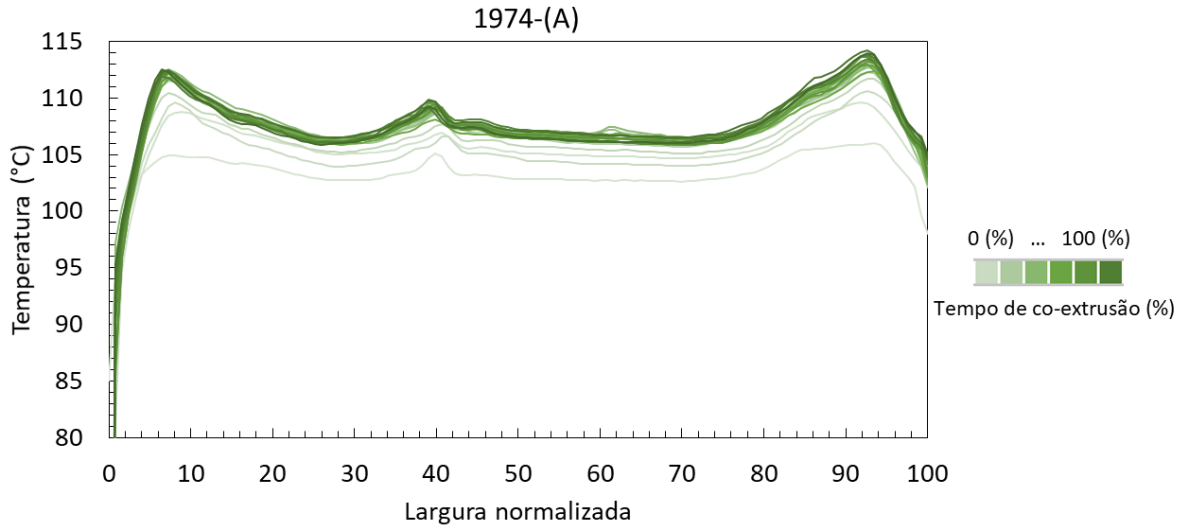
Código 972- Produção B

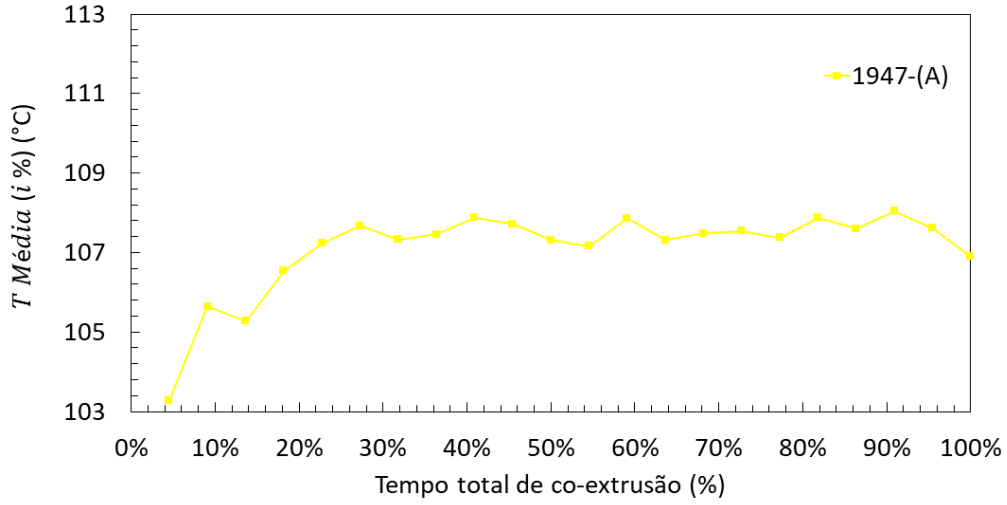


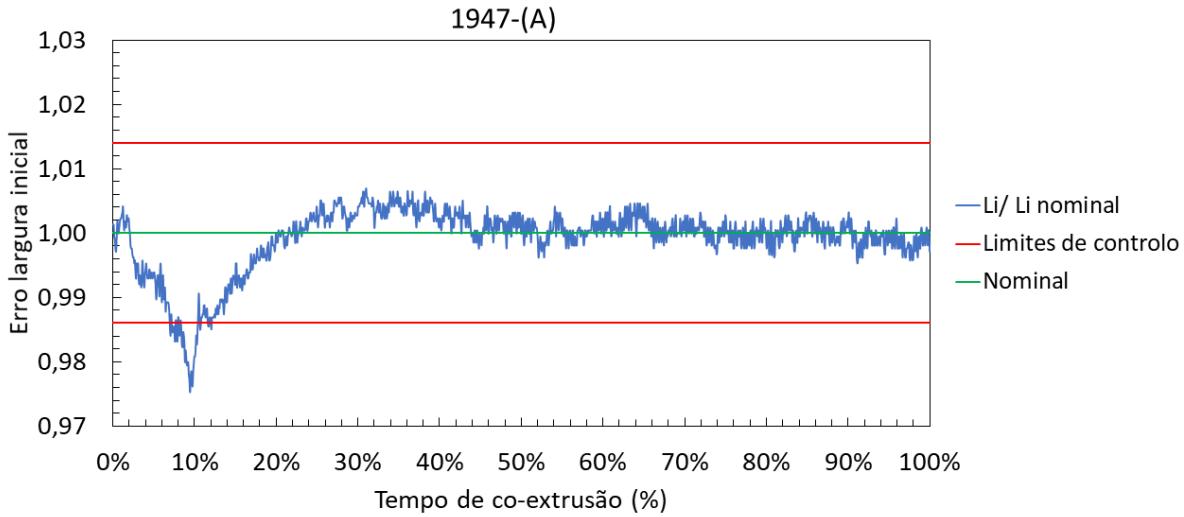




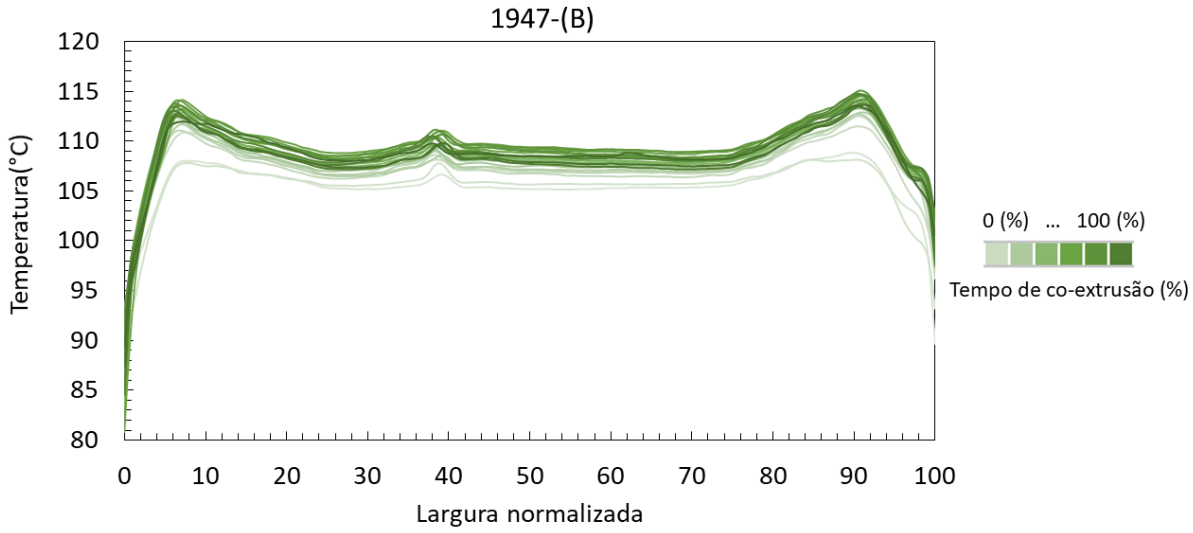
Código 1974- Produção A

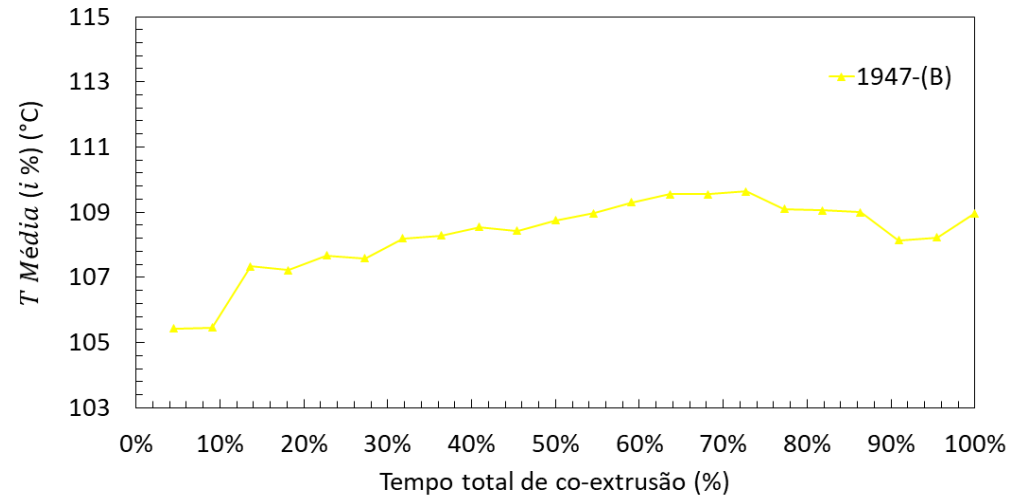


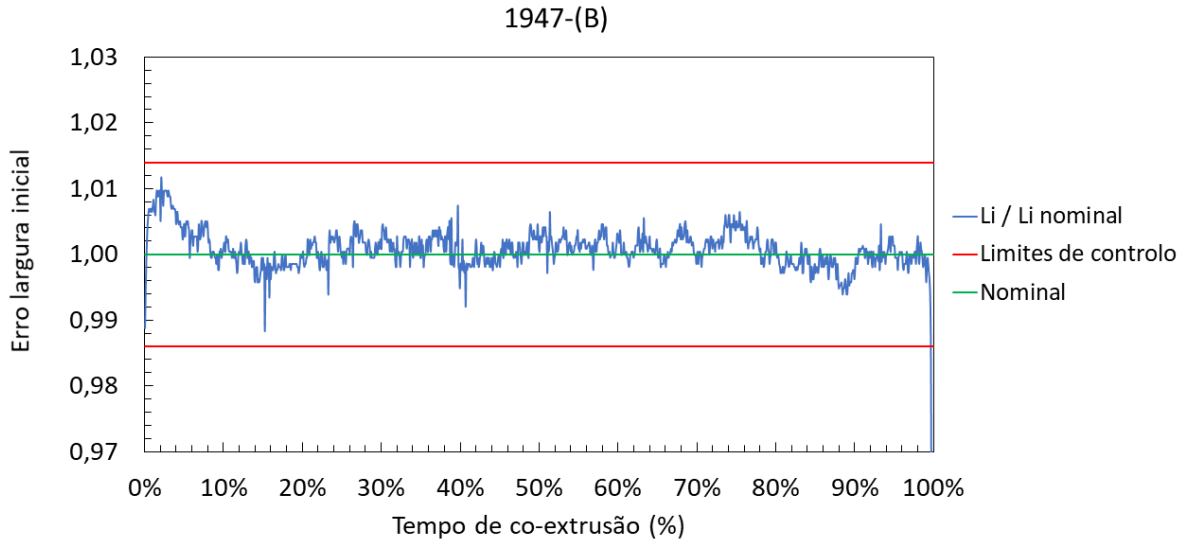




Código 1974- Produção B



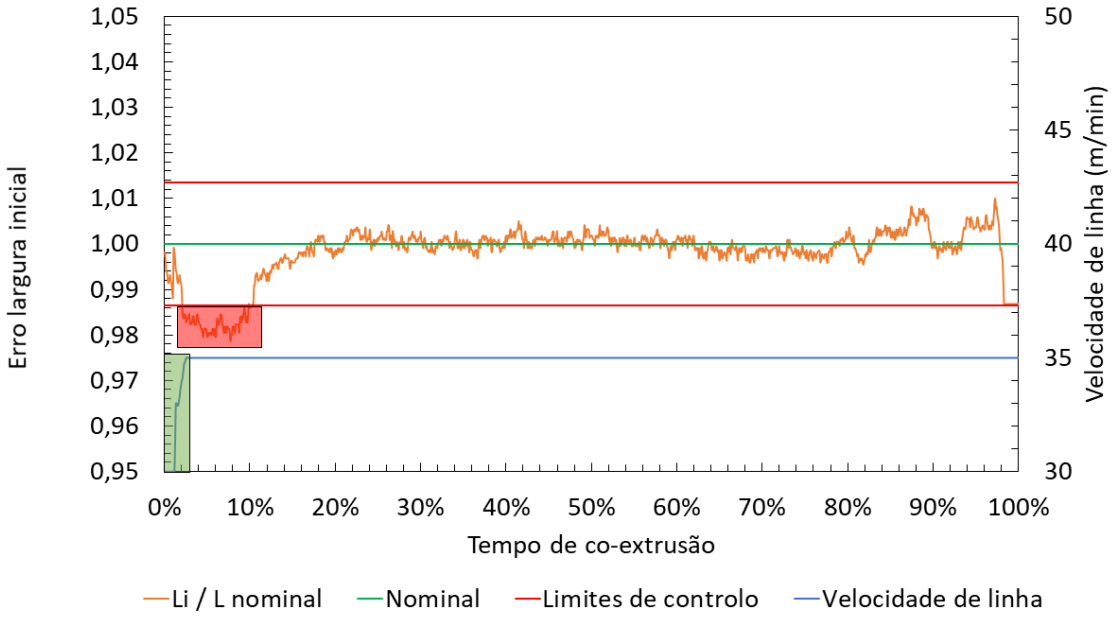




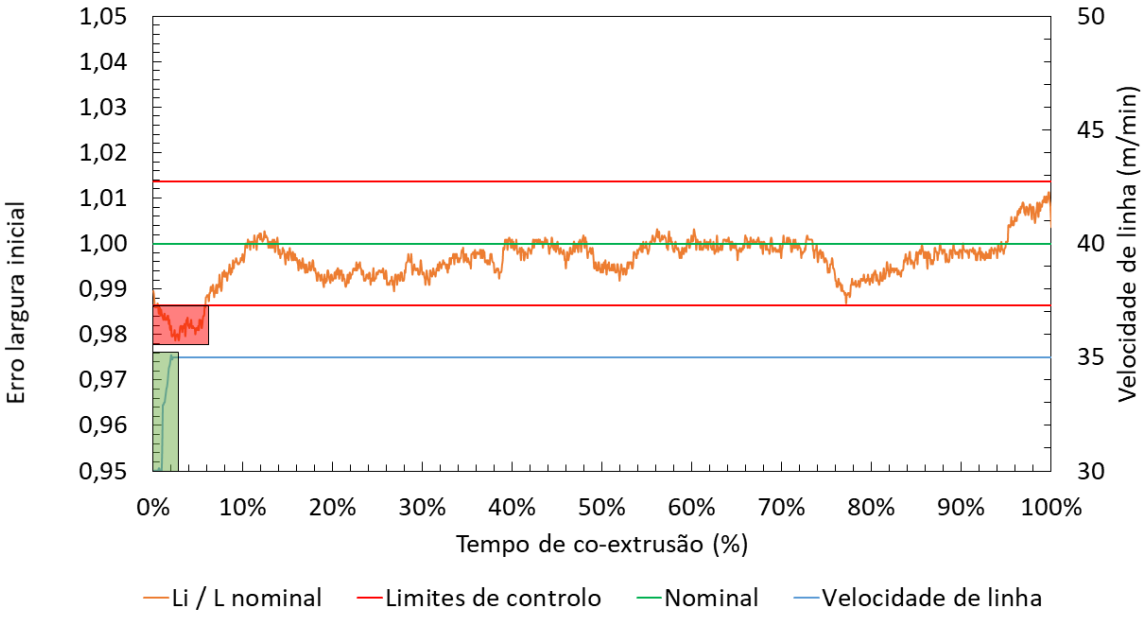
Anexo D. Resultados individuais: Teste C

Erro associado à largura inicial do perfil em função da velocidade de linha controlado pelo sistema RMEA

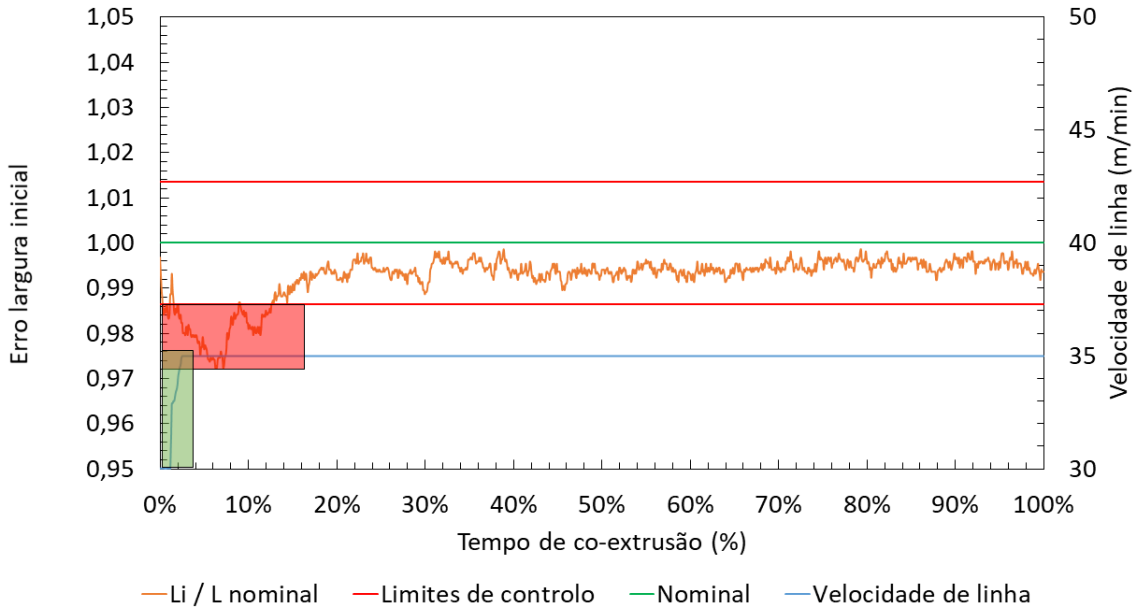
(3)



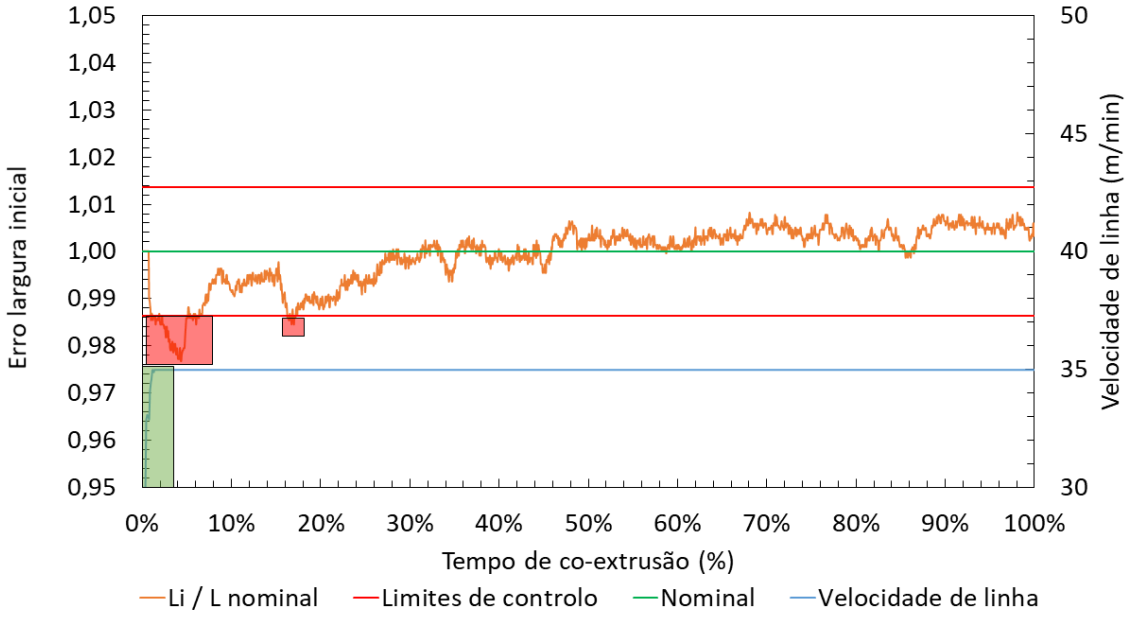
(4)

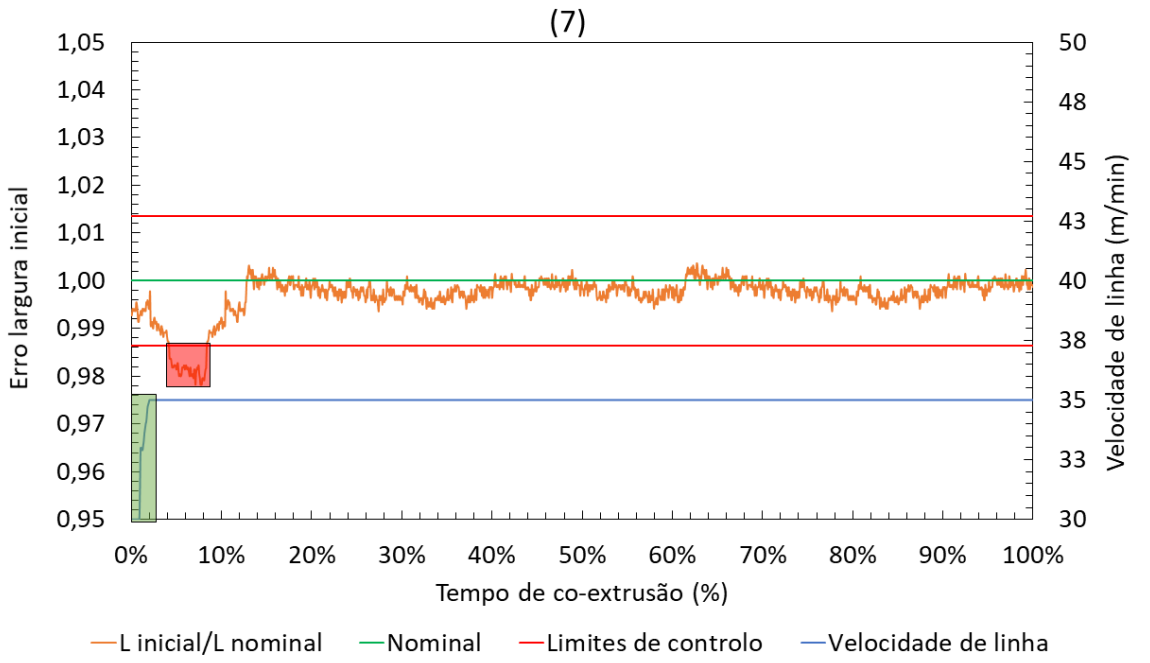


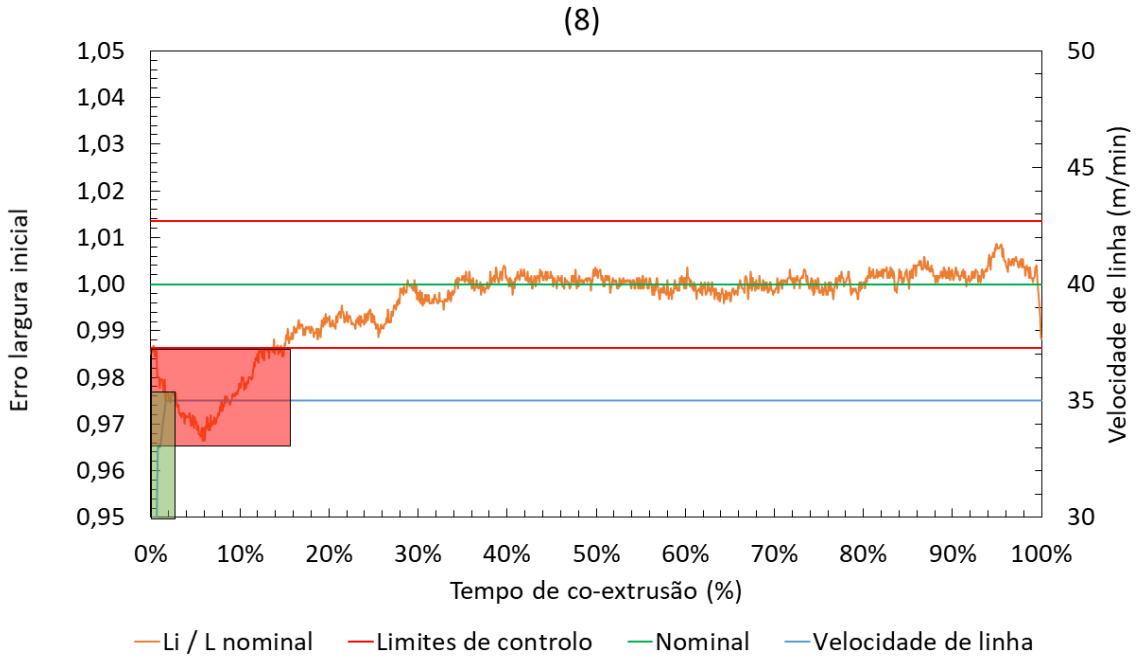
(5)


1,05
1,04
1,03
1,02
1,01
1,00
0,99
0,98
0,97
0,96
0,95
Erro largura inicial
50
45
40
35
30
Velocidade de linha (m/min)
0%
10%
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
90%
100%
Tempo de co-extrusão (%)
Li / L nominal
Limites de controlo
Nominal
Velocidade de linha

(6)


1,05
1,04
1,03
1,02
1,01
1,00
0,99
0,98
0,97
0,96
0,95
Erro largura inicial
50
45
40
35
30
Velocidade de linha (m/min)
0%
10%
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
90%
100%
Tempo de co-extrusão (%)
Li / L nominal
Limites de controlo
Nominal
Velocidade de linha


(7)
1,05
1,04
1,03
1,02
1,01
1,00
0,99
0,98
0,97
0,96
0,95
Erro largura inicial
50
48
45
43
40
38
35
33
30
Velocidade de linha (m/min)
0%
10%
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
90%
100%
Tempo de co-extrusão (%)
L inicial/L nominal
Nominal
Limites de controlo
Velocidade de linha


(8)
1,05
1,04
1,03
1,02
1,01
1,00
0,99
0,98
0,97
0,96
0,95
Erro largura inicial
50
45
40
35
30
Velocidade de linha (m/min)
0%
10%
20%
30%
40%
50%
60%
70%
80%
90%
100%
Tempo de co-extrusão (%)
Li / L nominal
Limites de controlo
Nominal
Velocidade de linha