

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

MARCOS VINICIUS MARTINS MACHADO

MELHORIAS NO PROCESSO DE EXTRUSÃO E VULCANIZAÇÃO DE PERFIS DE
BORRACHA DE BASE POLIMÉRICA

CAXIAS DO SUL
2021

MARCOS VINICIUS MARTINS MACHADO

MELHORIAS NO PROCESSO DE EXTRUSÃO E VULCANIZAÇÃO DE PERFIS DE
BORRACHA DE BASE POLIMÉRICA

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à Universidade de Caxias do
Sul como requisito parcial à obtenção do
grau de Engenheiro Mecânico.

Área de concentração: Engenharia Térmica
Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini

CAXIAS DO SUL
2021

MARCOS VINICIUS MARTINS MACHADO

MELHORIAS NO PROCESSO DE EXTRUSÃO E VULCANIZAÇÃO DE PERFIS DE
BORRACHA DE BASE POLIMÉRICA

Relatório de trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador TCC I: Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini

Aprovado _____ em
_____/_____/_____.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof.^a Dra. Camila Baldasso
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, que esteve ao meu lado durante minha vida, incentivando-me a seguir em frente, em todos os momentos.

Agradeço também à minha namorada, Carla, pela dedicação oferecida, pelo companheirismo e pela compreensão acerca dos momentos de ausência.

Meu agradecimento à Empresa Autotravi Borrachas e Plásticos por me permitir realizar este trabalho, confiando em minha capacidade. Aos meus colegas, que me auxiliaram durante este processo de formação.

Por fim, em especial, minha gratidão ao meu Orientador Professor Carlos Roberto Altafini que me conduziu durante a escrita deste trabalho, estando sempre disposto a sanar minhas dúvidas. Aos demais professores e colegas da Universidade de Caxias do Sul, que me acompanharam ao longo de todos estes anos de graduação.

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivo realizar melhorias no processo de extrusão e vulcanização de perfis de borracha com base em etileno-propileno-dieno-monômero (EPDM). O trabalho ocorreu em linhas de produção da empresa Autotravi Borrachas e Plásticos, visando atingir melhor qualidade, produtividade e redução de custos, a partir de melhorias estruturais, de parâmetro e de processo. Por essa razão, foi necessário realizar um estudo detalhado acerca da situação em que o processo da empresa se encontrava, identificando os principais problemas existentes com a finalidade de desenvolver projetos e colocá-los em prática para, por fim, estimar possíveis ganhos. Para isso, embasou-se teoricamente em artigos científicos com temas como borracha, vulcanização, extrusão e perfis de vedação de borracha, que justificaram a necessidade de criação de novos projetos. Estimou-se melhorias estruturais, de parâmetro e de processo que foram postas em prática e resultaram em ganhos no processo produtivo da empresa. A execução dessas melhorias findou em aumentos nas temperaturas das extrusoras, túneis de vulcanização e ainda nos perfis extrudados, além de obter também uma maior estabilidade nas temperaturas. As melhorias foram feitas em linhas diferentes e assim que comprovada a eficácia, foram sendo reproduzidas em outras linhas onde fosse possível a reprodução das mesmas.

Palavras-chave: Vulcanização. Extrusão. Perfis de borracha.

Área de conhecimento: Engenharia Mecânica, Engenharia Térmica.

ABSTRACT

This work aimed to accomplish improvements in the extrusion and vulcanization process of rubber seals based on ethylene-propylene-monomer (EPDM). The work took place in production lines of the Autotravi Borrachas e Plásticos company, aiming to get quality, productivity and cost savings, from structural, parameter and process improvements. For that, it was necessary to conduct studies on the situation in which the process found itself, recognizing the problems with the purpose of developing projects and putting them into practice to, finally, estimate possible gains. Therefore, it was theoretically based on scientific articles on topics such as rubber, vulcanization, extrusion and rubber sealing profiles, which justified the need for new projects. Improvements were estimated, according to the parameters and processes that were put into practice and resulted in gains for the company. The implementation of these improvements ended in increases on the temperatures of the extruders, vulcanization tunnels and even in the extruded profiles, in addition to obtaining greater temperature stability. The improvements were made in different lines and as soon as the effectiveness was proven, they were reproduced in other lines where it was possible to reproduce them.

Keywords: Vulcanization. Extrusion. Rubber seals.

Area of knowledge: Mechanical Engineering, Thermal Engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Moléculas de borracha com ligações cruzadas bisulfúricas.....	19
Figura 2 - Comparação das características de vulcanização (curvas reométricas) com diferentes aceleradores	22
Figura 3 - Extrusora de Henry Bewley e Henry Brooman.....	26
Figura 4 - Ilustração da primeira extrusora de fuso	27
Figura 5 - Componentes típicos de uma extrusora de fuso.....	28
Figura 6 - Características geométricas de um fuso de uma extrusora	28
Figura 7 - Extrusora com pinos de G. Menges e E.G. Harms.	30
Figura 8 - Tipos de pinos tangenciais em extrusoras.	31
Figura 9 - Resultado do estudo da Colmec, SpA	31
Figura 10 - Esquemática de uma extrusora com bomba de engrenagens.	32
Figura 11 - Perfis de Borracha	33
Figura 12 - Divisões das refrigerações.....	36
Figura 13 - Montagem de um termopar no cabeçote da extrusora.....	36
Figura 14 - Módulo para até quatro resistências elétricas	38
Figura 15 - Módulo para até oito resistências elétricas	38
Figura 16 - Cavidade para posicionamento da resistência.....	39
Figura 17 - Isolamento de fibra cerâmica com uma camada de alumínio	39
Figura 18 - Resistência elétrica tubular em formato de U	40
Figura 19 - Junta soldada entre módulos	41
Figura 20 - Porta soldada entre dois módulos.....	41
Figura 21 - Painel do IHM	42
Figura 22 - Fluxograma das atividades propostas.....	44
Figura 23 - Datalogger utilizado para medição das temperaturas dos túneis.....	45
Figura 24 - Tacômetro utilizado para medição das velocidades das esteiras	45
Figura 25 - Soprador de ar quente para movimentação do ar.....	46
Figura 26 – Comparação dimensional entre as resistências elétricas.....	48
Figura 27 - Esquema de um módulo do túnel.....	49
Figura 28 – Soprador de ar quente instalado	52
Figura 29 - Túnel de pré-choque	53
Figura 30 - Primeira medição de temperaturas da linha 203.....	56
Figura 31 - Curva de temperatura final da linha 203	56

Figura 32 - Curva de temperaturas da linha 430 antes do uso do soprador de ar quente	58
Figura 33 - Curva de temperaturas da linha 430 sem ajustes após o uso do soprador de ar quente	59
Figura 34 - Curva de temperaturas da linha 430 com uso do soprador de ar quente e ajustada.....	59
Figura 35 - Curva de temperatura da linha 414 antes da troca de resistências	60
Figura 36 - Curva de temperatura da linha 414 após a troca de resistências	61
Figura 37 - Curva de temperatura da linha 414 após a troca de resistências e ajustada.....	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Importância do tamanho da partícula e da estrutura dos negros de fumo sobre as propriedades de um composto	21
Quadro 2 - Código da linha e tipo do produto	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões dos túneis de ar quente	37
Tabela 2 - Erros nas velocidades das esteiras.....	51
Tabela 3 - Dados coletados durante o uso do túnel de pré-choque	63

LISTA DE SIGLAS

EPDM	Borracha etileno-propileno-dieno (<i>ethylene propylene diene methylene rubber</i>)
LCM	Liquid Curing Media
IR	Borracha de poliisopreno
SBR	Borracha de butadieno estireno
CR	Borracha de policloropreno
BR	Borracha de polibutadieno
NBR	Borracha nitrílica
AU	Borracha de poliuretano
CLP	Controlador lógico programável
IHM	Interação homem-máquina
RPM	Rotações por minuto
PV	Valor medido (<i>Process Variable</i>)
SV	Valor desejado (<i>Setpoint Value</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	AMBIENTE DE TRABALHO.....	11
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
1.3	OBJETIVO GERAL.....	13
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	BORRACHA.....	14
2.1.1	Borracha natural.....	15
2.1.2	Borracha sintética.....	16
2.1.3	Borracha etileno-propileno-dieno (EPDM).....	17
2.2	VULCANIZAÇÃO.....	18
2.2.1	História da Vulcanização.....	19
2.2.2	Ingredientes de formulação.....	20
2.2.2.1	Cargas.....	20
2.2.2.2	Agentes de vulcanização.....	21
2.2.2.3	Ativadores de vulcanização.....	21
2.2.2.4	Aceleradores.....	22
2.2.2.5	Plastificantes.....	23
2.2.2.6	Agentes de proteção.....	23
2.2.3	Processos de vulcanização.....	24
2.3	EXTRUSÃO.....	25
2.4	PERFIS DE VEDAÇÃO DE BORRACHA.....	32
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	34
3.1	PROCESSO.....	34
3.1.1	Extrusoras.....	35
3.1.2	Túneis de ar quente.....	37

3.1.3	Sistema controlador de temperatura Interação Homem-Máquina (IHM)	41
3.1.4	Parâmetros de trabalho	42
3.2	O PROBLEMA DE DESEMPENHO NA PRODUÇÃO	43
3.3	INSTRUMENTAÇÃO	44
3.3.1	<i>Datalogger</i>	44
3.3.2	Tacômetro	45
3.3.3	Soprador de ar quente	46
3.3.4	Termômetro de mira a laser	46
3.4	MELHORIAS ESTRUTURAIS	47
3.4.1	Posição correta dos termopares	47
3.4.2	Alteração do tipo de resistência elétrica	47
3.5	MELHORIAS DE PARÂMETROS DE TRABALHO	48
3.5.1	Homogeneização das temperaturas do túnel de vulcanização	49
3.5.2	Implantação de um CLP no sistema IHM	50
3.6	MELHORIAS DE PROCESSO	51
3.6.1	Aferição da velocidade da esteira	51
3.6.2	Soprador de ar quente	52
3.6.3	Túnel de pré-choque	53
3.6.4	Túnel de pré-aquecimento da esteira	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	HOMOGENEIZAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO TÚNEL DE VULCANIZAÇÃO	55
4.2	SOPRADOR DE AR QUENTE	57
4.3	ALTERAÇÃO DO TIPO DE RESISTÊNCIA	60
4.4	TÚNEL DE PRÉ-CHOQUE	62
4.5	TÚNEL DE PRÉ-AQUECIMENTO DA ESTEIRA	63
5	CONCLUSÕES	65

6	REFERENCIAL TEÓRICO	67
----------	----------------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

Borracha é um polímero que pode ser de origem natural ou artificial. A borracha natural é obtida por meio do látex, produzido em muitas espécies vegetais tropicais. Mas praticamente toda a produção mundial de borracha natural vem da extração da seringueira (*Hevea brasiliensis*). Por método de incisões no caule, o líquido escorre, sendo coletado em um recipiente. Imitando a reação que ocorre nas árvores da seringueira, os cientistas passaram a realizar reações de polimerização de adição de compostos, produzindo vários tipos de borrachas sintéticas. Dependendo do tipo de monômero que se usa para produzir o polímero, conseguem-se borrachas com diferentes propriedades. Os monômeros são moléculas que formam a unidade básica de um polímero, eles ligam-se entre si através do processo de polimerização para formar cadeias de moléculas. Atualmente, as borrachas sintéticas são mais utilizadas do que a borracha natural. Hoje existem, ao todo, cerca de cem variedades diferentes de borracha sintética, com características e empregos específicos (RUBBERPEDIA, 2021).

Dentre as variedades, encontram-se as borrachas EPDM, onde E, P e D significam etileno-propileno-dieno e o M significa que a borracha tem uma cadeia saturada. As borrachas EPDM são terpolímeros de etileno e propileno, que foram desenvolvidas a partir do copolímero EPM, com a adição do dieno. O dieno fornece duplas ligações à molécula, permitindo que a vulcanização seja feita pelo sistema convencional. As principais aplicações destas borrachas se encontram na indústria automotriz, indústria da construção, indústria química, indústria do calçado, indústria eletrotécnica e equipamentos esportivos (RUBBERPEDIA, 2021).

1.1 AMBIENTE DE TRABALHO

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica foi realizado junto à empresa Autotravi Borrachas e Plásticos. A empresa Autotravi atua no setor de fabricação de perfis extrudados de borrachas e plásticos e comercializa produtos de diversos segmentos, como montadoras de ônibus, máquinas agrícolas, auto peças e indústrias em geral. Os produtos são comercializados em parte do continente americano. É localizada na Estrada Municipal Santo Bortolini, no bairro Bela Vista, cidade de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul. A empresa opera no setor

de vedações, acabamentos automotivos e industriais. Dentre os principais clientes estão as empresas Marcopolo, John Deere, Fairchild (empresa norte americana), CNHi e AGCO.

A Autotravi produz perfis com variados tipos de borrachas, diferenciando-se umas das outras por suas características, como a dureza. A partir da dureza as borrachas são classificadas em dois grandes grupos: esponjosas e maciças. Independentemente de suas propriedades, quase todos os tipos de borrachas produzidas são com base em EPDM. Os perfis de maior lucratividade são os produtos feitos a partir de perfis de bielastômero, produzidos com dois tipos de borracha com durezas distintas. O processo de fabricação dos perfis de borracha passa pelo desenvolvimento da borracha sintética, pela extrusão, pela vulcanização e, de acordo com as características de cada produto, podem haver etapas de juntas emendadas e acabamentos diversos.

Para realizar o processo de vulcanização da borracha, são utilizados túneis de ar quente que operam a partir de resistências elétricas para alcançar temperaturas elevadas acelerando a vulcanização. Isso requer melhorias para que alcance ganhos de produtividade, eficácia e eficiência. Em virtude disso, o trabalho buscou as melhorias por meio de avaliações e a identificação de novas técnicas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho é importante pois deve resultar em melhorias no processo de extrusão e vulcanização de perfis de borracha com base em etileno-propileno-dieno-monômero (EPDM) nas linhas de produção da empresa sob estudo – Autotravi Borrachas e Plásticos. A partir dos resultados obtidos com o trabalho, a empresa se beneficiará, tendo ganhos na produtividade, reduzindo custos.

O processo de extrusão e vulcanização de perfis de borracha com base em EPDM produzidos atualmente requer maior agilidade e produtividade, pois encontra-se defasado. Para isso, buscou-se um padrão de qualidade e como membro do grupo de Engenharia de Processos da empresa em questão, foi necessário explorar possíveis melhorias no processo de vulcanização.

Para demonstrar a necessidade de tais melhorias, pode-se citar os dados de refugo gerados pela empresa, onde nos primeiros quatro meses do ano de 2021 estavam próximos a 10% da produção total. Os principais problemas geradores de

refugo são as perdas de largada pós *setup*, perfis com bolhas causadas por temperatura alta e perfis mal vulcanizados.

1.3 OBJETIVO GERAL

Realizar melhorias no processo de extrusão e vulcanização de perfis de borracha com base em etileno-propileno-dieno-monômero (EPDM) em linhas de produção da empresa estudada, visando garantir que as temperaturas do processo produtivo fossem alcançadas e aumentar a estabilidade das mesmas, contribuindo, com isso, na qualidade, produtividade e redução de custos.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Em atendimento ao objetivo geral apresentado, são previstos os seguintes objetivos específicos:

- caracterizar a situação real do túnel de vulcanização em termos construtivos/dimensionais
- avaliar o desempenho das resistências elétricas tubulares de aquecimento dos túneis de vulcanização, visando a substituição por resistências de formato plano;
- homogeneizar as temperaturas do túnel, em busca de uma maior estabilidade no processo;
- analisar o uso de sistemas externos, como túneis de pré-choque para aquecimento dos perfis e túneis de pré aquecimento da esteira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica são elucidados alguns dos conceitos fundamentais para a cognição do estudo sobre o processo de extrusão e vulcanização da borracha.

2.1 BORRACHA

A borracha é um dos materiais mais importantes do mundo moderno. O mercado global de produtos advindos do polímero consolidou-se em razão de ser responsável pela fabricação de diversas mercadorias utilizadas cotidianamente nos mais diversos sistemas existentes, destacando-se por sua versatilidade, elasticidade, resistência e capacidade de vedação.

A borracha natural é uma substância obtida na natureza, através da coagulação do líquido extraído do tronco da seringueira, o látex. A borracha também é obtida através do refino do petróleo, conhecida como borracha sintética. Essa borracha tem uma grande participação em um dos mercados mais importantes do mundo: o mercado automobilístico. Cerca de 80% de toda produção de borracha produzida no mundo é destinada a ele (MONTENEGRO; PAN, 1997).

A palavra polímero origina-se do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição). Desta forma, um polímero é uma macromolécula composta por dezenas de milhares de unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A matéria prima para a produção de um polímero é o monômero - uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. De acordo com o tipo do monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, divide-se os polímeros em três classes: plásticos, borrachas e fibras (CANEVAROLO JÚNIOR, 2002).

Elastômero, por sua vez, é um elemento macromolecular que retoma rapidamente a sua forma e dimensões iniciais, após cessar a aplicação de uma força. Deste modo, borracha é um elastômero que já está ou pode ser modificado para um estado no qual é essencialmente insolúvel, passível a aumentar de volume num solvente em ebulição, bem como benzeno, metiletilcetona e etanol-tolueno azeotrópico, e que, no seu estado modificado, não pode ser reprocessado para uma

forma definitiva por aplicação de calor e pressão moderadas, de acordo com a Norma ISO 1382:1996.

De acordo com o *International Rubber Study Group* (Grupo internacional de estudo da borracha), o consumo mundial total de borracha diminuiu cerca de 1,0% em 2019, antes de despencar em 2020 devido à pandemia de COVID-19. A lentidão do crescimento econômico global, em parte devido ao conflito comercial entre os EUA e a China, explica a desaceleração em 2019. A demanda por borracha sintética foi baixa em 2019, devido ao crescimento lento dos mercados de automóveis de passageiros da China e da Índia. Já a produção mundial total de borracha diminuiu 1,1% em 2019, motivada pela queda da produção nos principais produtores, Tailândia, Indonésia e Malásia. Os preços baixos persistentes durante os últimos cinco anos desencorajaram os pequenos agricultores. A produção caiu significativamente em 2020 devido ao fechamento de fábricas durante a pandemia.

2.1.1 Borracha natural

A borracha natural (NR) é um polímero natural advindo da coagulação do látex extraído de algumas espécies vegetais. Quimicamente, a borracha natural é um polímero do isopreno - hidrocarboneto alifático, incolor, volátil, com 5 átomos de carbono e duas ligações duplas conjugadas com a fórmula $\text{CH}_2 = \text{CH}-\text{C}(\text{CH}_3) = \text{CH}_2$. É uma unidade estrutural de grande variedade de substâncias naturais (CTB 2021).

As primeiras referências à borracha natural apareceram em relatos da segunda viagem da “descoberta” do Novo Mundo por Cristóvão Colombo, entre 1495 e 1496. Na viagem, ele teria avistado indígenas americanos brincando com bolas que quicavam e eram feitas do “suco” de árvores. As primeiras amostras da nova substância só seriam enviadas para a Europa 240 anos depois, quando um cientista francês, Charles de la Condamine, visitou o Equador e deu à borracha o termo francês “*caoutchouc*”, derivado de uma palavra inca que significa “árvore que chora” (LE COUTEUR; BURRESON, 2006).

Muitas espécies de plantas produzem borracha natural. A espécie *Hevea brasiliensis*, nativa da bacia amazônica e que foi levada aos países tropicais da Ásia e da África no final do século XIX, é a fonte da borracha natural. *Hevea brasiliensis* pode ser cultivada em clima tropical úmido. A borracha é extraída na forma de látex,

um líquido branco e leitoso que é retido nas células encontradas nas camadas internas da casca das árvores, usando um método conhecido como “batimento”, que consiste em aparar uma fina fatia da casca da árvore sem danificar a camada de crescimento em uma série de cortes em meia espiral, geralmente em dias alternados, usando uma faca especial. O látex então escorre do corte e flui para um copo coletor por um período de várias horas ou mais até que comece a coagular e o fluxo cesse (OMONT, 1990).

Após a coleta, o látex - que neste ponto é cerca de 70% de água - é processado: é “peneirado” para remover matérias estranhas; misturado; coagulado; enrolado em folhas e então seco em “fumódromos”. Como alternativa, após a coagulação, pode ser lavado, triturado e granulado antes de ser seco em secadores para formar um “bloco” de borracha conhecido como “borracha tecnicamente especificada” (TSR). A borracha é então prensada em fardos e embrulhada em sacos de polietileno para envio.

2.1.2 Borracha sintética

Em 1826, Michael Faraday definiu a estrutura molecular da borracha natural, enquanto em 1860 Greville Williams foi capaz de usar borracha natural para destilar um álcool, que ele chamou de “isopreno”. Porém, foi somente no início do século XX, quando a demanda por borracha ultrapassou a oferta, fazendo com que os preços subissem, que se deram os primeiros passos para sintetizar um material alternativo. (LARROUSE, 1972) Em 1909, Fritz Hofmann conseguiu polimerizar o metil isopreno: o primeiro sintético da borracha. Em 1910 que a produção comercial de borracha sintética se tornou viável, quando a descoberta foi feita de forma independente por dois ingleses e um alemão (LE COUTEUR e BURRESON, 2006).

Existem mais de 200 tipos de borracha sintética, cada um com seus próprios constituintes e qualidades. Todos envolvem o processo de polimerização, que é a junção química dos monômeros para formar um polímero. Fisicamente, a polimerização converte o monômero, geralmente um líquido ou um gás, em uma borracha, plástico ou fibra, dependendo da natureza química do monômero (RUBBERPEDIA, 2021).

O estireno butadieno (SBR) é responsável por cerca de 37% da capacidade mundial de borracha sintética sólida, e é feito de dois monômeros - estireno, um

líquido, e butadieno, um gás. A maioria dos monômeros é derivada de óleo. O estireno é geralmente feito de etilbenzeno (IISRP, 1973).

A polimerização de estireno butadieno também é conduzida na presença de um catalisador. A polimerização pode ser realizada pelo método tradicional, que é a dispersão de monômeros em água como uma emulsão, ou em solução em um solvente orgânico (GOMES, 2012).

Alguns dos diferentes compostos de borrachas sintéticas são os seguintes:

- a) borracha de poliisopreno (IR);
- b) borracha de butadieno estireno (SBR);
- c) borracha de policloropreno (CR);
- d) borracha de polibutadieno (BR);
- e) borracha nitrílica (NBR);
- f) borracha de poliuretano (AU e EU).

2.1.3 Borracha etileno-propileno-dieno (EPDM)

Os desafios encontrados pelo mundo industrializado na última década sondam adequações à nova realidade de mercado. As indústrias buscam atender às exigências crescentes existentes. Deste modo, surgem ideias atualizadas, novos materiais, tecnologias e conceitos que promovem crescimento. As diversas indústrias produtoras de polímeros acompanham esta adequação, desenvolvendo produtos e ofertando materiais com maior qualidade e com preços atrativos, como é o caso do EPDM (GARBIM, 2011).

Os elastômeros de etileno propileno surgiram com a descoberta dos catalisadores específicos desenvolvidos por Giulio Natta e Karl Ziegler que descobriram um sistema capaz de produzir copolímeros de etileno-propileno amorfos com características elastoméricas. Os pesquisadores Ziegler e Natta receberam o Prêmio Nobel de Química em 1963 por estas significativas descobertas (GARBIM, 2011).

O EPDM é um elastômero sintético não resistente a derivados de petróleo, mas resistente ao ozônio, intemperismo, radiação UV e temperatura em condições de trabalho até 140 °C, sendo que a temperatura de uso está na faixa de -20 °C a +140 °C. É o elastômero com maior capacidade de incorporar cargas. A cura pode ser peroxídica ou com doadores de enxofre e requer temperaturas de cura acima de

150 °C. Este elastômero, por ter elevado teor de olefinas e não apresenta boas características de adesão (GRISON, 2010).

Antes de vulcanizar, o EPDM é um material termoplástico com boa estabilidade quando armazenado. Após o processo de vulcanização, torna-se um material termorrígido cuja rigidez não se altera com a temperatura, resistente ao envelhecimento, flexível às temperaturas baixas e com pouca elasticidade. É usado em pneus, revestimento de fios e cabos elétricos, sola de sapatos, guarnições de janelas, portas e para-brisa, mangueiras e retentores (CANEVAROLO JÚNIOR, 2002).

A borracha EPDM é usada principalmente na indústria automotiva para vedação de carrocerias automotivas, mangueiras de radiadores, peças de freios e cintos ou suportes de motor, incluindo limpadores de para-brisa. Eles apresentam densidade muito baixa e são altamente resistentes ao oxigênio, ozônio, calor e irradiação. As borrachas de EPDM reticuladas também têm boas propriedades mecânicas e elásticas (MANO, 2001).

2.2 VULCANIZAÇÃO

De acordo com Passador et al. (2007), vulcanização é a comutação da borracha através de um processo químico de formação de ligações cruzadas. Ou seja, é um processo onde as cadeias moleculares, até então independentes, são unidas através de ligações químicas primárias formando reticulados, que levam à formação no material de uma rede tridimensional. Tal organização estrutural consente manter ou promover as propriedades elásticas e reduzir o comportamento plástico do material. O elastômero se torna insolúvel e mais resistente fisicamente num intervalo de temperatura maior que o da borracha não vulcanizada.

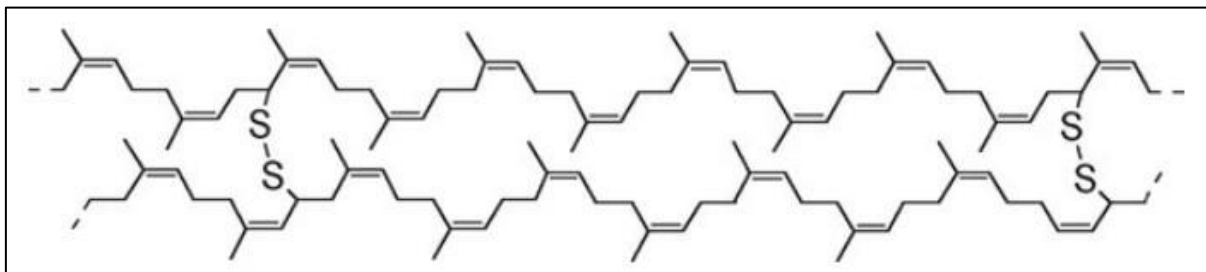
As borrachas não vulcanizadas têm pouca prestatividade comercial, para a maioria das aplicações, a borracha deve ser modificada, normalmente pela adição de um agente de vulcanização e outros agentes, como os aceleradores e as cargas (HARPER, 2002).

2.2.1 História da Vulcanização

Em 1839, Charles Goodyear consolidou a descoberta da vulcanização da borracha, termo utilizado para formações de ligações cruzadas, realizada basicamente com o material enxofre (CANEVAROLO JÚNIOR, 2013).

Charles Goodyear aqueceu borracha natural misturada com pó de enxofre e um pouco de óxido de chumbo. A mistura resultou em uma borracha resistente, elástica e estável às variações de temperatura (CANTO, 2004). Ao acrescentar enxofre à borracha natural e aquecer a mistura, acabou produzindo ligações cruzadas formadas por meio de ligações entre dois enxofres, o processo de aquecimento fez-se necessário para contribuir com a formação dessas novas ligações. A criação de uma quantidade suficiente dessas ligações bisulfúricas permite que as moléculas de borracha permaneçam flexíveis, mas impede que escorreguem umas pelas outras (LE COUTEUR; BURRESON, 2006). A Figura 1 mostra as ligações cruzadas de dois átomos de enxofre.

Figura 1 - Moléculas de borracha com ligações cruzadas bisulfúricas



Fonte: Le Couteur e Burreson (2006)

Depois da descoberta de Goodyear, a borracha vulcanizada tornou-se uma das mais importantes mercadorias do mundo e material básico em tempo de guerra. A porcentagem modesta de 0,3% de enxofre mostrou-se suficiente para alterar o grau de elasticidade da borracha natural, tornando-a estável: não grudenta quando quente, nem quebradiça quando fria (PAPAUTSKYD, 2013).

A borracha macia usada para fazer elásticos contém cerca de 1 a 3% de enxofre; a borracha feita com 3 a 10% de enxofre tem mais ligações cruzadas, é menos flexível e usada para pneus de veículos. Com mais ligações cruzadas ainda, a borracha se torna rígida demais para ser usada em aplicações que exigem flexibilidade (SHREVE, 1977).

2.2.2 Ingredientes de formulação

No momento atual, a ciência dos materiais poliméricos vem avançado em sistema de modificações estruturais, promovendo diferentes combinações entre polímeros termoplásticos com elastômeros, o que permite obter novos materiais que ofereçam propriedades técnicas semelhantes aos termofixos, entretanto, com processabilidade similar a dos termoplásticos (GARBIM, 2011).

A formulação de compostos de borracha compreende a seleção de ingredientes específicos para obter as propriedades necessárias na utilização final do composto. Uma vez que a interação dos diferentes ingredientes nas propriedades do produto é altamente não linear, boa parte deste conhecimento é adquirida através de experiência, tentativas e erros. Muitas vezes é preciso conciliar requisitos conflitantes, como no caso da banda de rodagem de pneus, nos quais é necessário ter boa resistência ao desgaste, impacto, propriedades necessárias para um melhor desempenho em cada necessidade. Entre os principais componentes utilizados na formulação pode-se citar os polímeros (borracha natural ou sintética), as cargas reforçantes, o sistema protetivo e o sistema vulcanizante (GARBIM, 2011).

2.2.2.1 Cargas

São comercializados no mercado dois tipos de cargas: cargas reforçantes brancas (sílicas) e cargas reforçantes negras, conhecida como negro de carbono ou negro de fumo, utilizadas em composições de borracha.

Segundo Shackelford (2008) as cargas têm por finalidade reforçar as propriedades físicas de determinados materiais, aumentando a rigidez, resistência ao rasgo e o desgaste de um composto. Os reforços geralmente passam por uma modificação superficial com o propósito de garantir uma melhor adesão interfacial com o polímero, melhorando as propriedades do composto. Algumas cargas inertes ou de enchimento têm como objetivo baratear o produto e manter suas propriedades de processamento (ROCHA; LOVISON; PIEROZAN, 2007). Essas possuem grande influência nas propriedades físicas e de processamento do material, sujeito à dimensão da partícula utilizada no composto em sua mistura. O Quadro 1 relaciona as propriedades de um composto com o tamanho da partícula e da estrutura dos negros de fumo.

Quadro 1 - Importância do tamanho da partícula e da estrutura dos negros de fumo sobre as propriedades de um composto

Propriedade	Diminuindo-se o tamanho da partícula (aumento do n° iodo) Estrutura constante	Aumentando-se a estrutura (aumento da absorção de DBP) Tamanho da partícula constante
Dureza	Aumenta	Aumenta
Carga de ruptura	Aumenta	Diminui
Módulo	Pouco efeito	Aumenta
Alongamento	Diminui	Diminui
Resiliência	Diminui	Pouco efeito
Viscosidade	Aumenta	Aumenta
Dispersão	Diminui	Aumenta
Estabilidade dimensional	Não há influência	Aumenta

Fonte: Adaptado de Rocha; Lovison; Pierozan (2007)

2.2.2.2 Agentes de vulcanização

Tem-se como agente de vulcanização as substâncias que, quando misturadas à borracha, promovem as reticulações entre as macromoléculas dos elastômeros. De acordo com o tipo químico de elastômero, admite-se um perfil apropriado de agente de vulcanização (ROCHA; LOVISON; PIEROZAN, 2007). Transforma o elastômero de propriedades fracas em uma borracha forte e elástica.

O agente de vulcanização é o responsável pela grande transformação que ocorre com o elastômero, passando de plástico a elástico, de solúvel a insolúvel, etc. O enxofre é o material mais comum utilizado na vulcanização dos elastômeros insaturados, emprega-se a forma rômica (solúvel) ou em forma amorfa (insolúvel) (ROCHA; LOVISON; PIEROZAN, 2007).

Pela reação de reticulação, há a formação de um material termofixo, quando adicionado calor e pressão, o material não amolece, mas com a ação do tempo ele se decompõe quimicamente. Termofixos não podem ser remodelados, sua formação é irreversível (HAGE, 1998).

2.2.2.3 Ativadores de vulcanização

Ativadores têm como propósito reduzir o tempo estimado de vulcanização por meio de ativação do sistema de aceleração, aumentando sua eficácia. Em

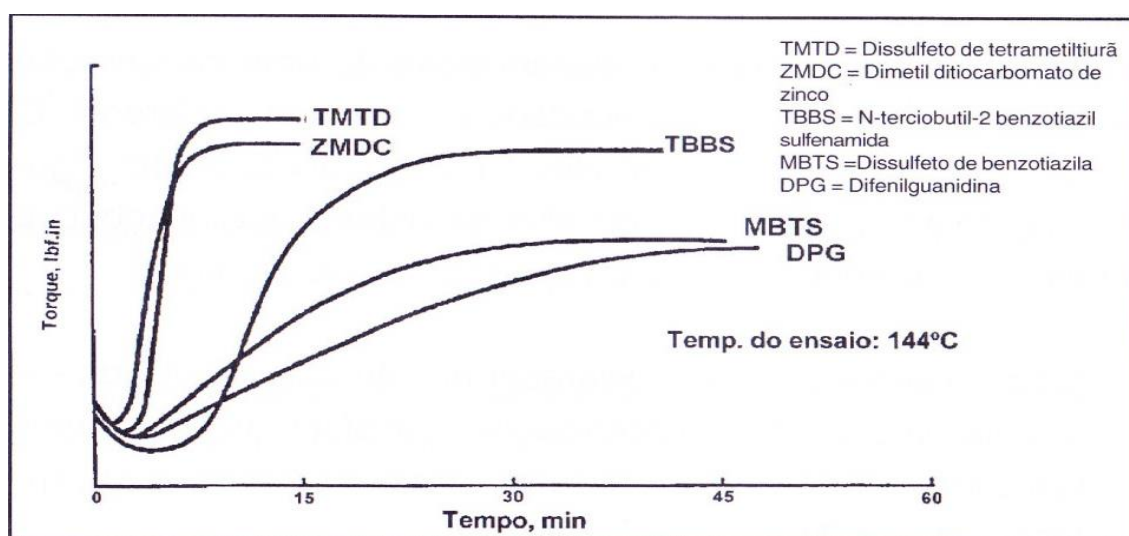
composições de elastômeros são utilizados o óxido de zinco (ZnO) e o ácido esteárico, utilizado para borrachas de cadeias insaturadas, outros materiais desempenham a mesma função como óxidos de chumbo (ROCHA et al., 2007). A reação com óxido de zinco (ZnO) provoca o rompimento da molécula rômica do enxofre, solubilizadas pelo ácido esteárico e direcionadas aos pontos insaturados na cadeia do composto (SILVA, 2000).

2.2.2.4 Aceleradores

Aceleradores são substâncias que, quando combinadas ao agente de vulcanização, também reduzem o tempo de vulcanização, contribuindo para o aumento da eficiência de reticulação, apurando as propriedades físicas. (ROCHA et al., 2007)

Existem variantes que estimulam a seleção de qual acelerador deve-se utilizar em uma mistura: o tempo e a temperatura de vulcanização de um composto baseiam-se no tipo e quantidade de acelerador que é utilizado no sistema. Encontram-se várias alternativas a fim de achar o que mais se adequa à determinada condição, conforme apontado na Figura 2.

Figura 2 - Comparação das características de vulcanização (curvas reométricas) com diferentes aceleradores



Fonte: Monsanto (1977)

2.2.2.5 Plastificantes

Os plastificantes são materiais líquidos de baixo peso molecular, com capacidade de melhorar as características de viscosidade durante o processo de mastigação do polímero, com finalidade de reduzir a viscosidade do elastômero e contribuindo com a incorporação dos aditivos, auxiliando no processo de mistura do composto (EBEWELE, 2000).

Faz-se necessário apurar a compatibilidade do óleo com o elastômero, o que depende do produto que receberá-lo. O acréscimo de plastificantes em polímeros diminui a temperatura de transição vítrea. Sua atuação é através da solvatação, que aumenta a distância intermolecular, diminuindo as forças de ligação (EBEWELE, 2000).

2.2.2.6 Agentes de proteção

Todo material polimérico corre risco de sofrer com a ação do envelhecimento natural ou acelerado, resultante em rupturas ou alterações nas cadeias do material, principalmente nos pontos de insaturação da cadeia. Visto que o material sofre alteração com o tempo, faz-se necessário utilizar-se de agentes de proteção, que, por sua vez, diminuem os impactos dos agentes catalisadores de envelhecimento, promovendo durabilidade ao composto. A ação da luz, calor, ozônio, entre outros, são agentes causadores do envelhecimento, o que causam a degradação do material (ROCHA et al., 2007).

Utiliza-se o negro de fumo nas formulações com objetivo de agregar à borracha sua resistência aos esforços e à abrasão; e os óleos são misturas que desempenham o papel de conferir maciez à borracha e aumentar sua maleabilidade. O enxofre é usado para ligar as cadeias de polímeros dentro da borracha e também endurecer e prevenir a sua deformação excessiva devido às elevadas temperaturas. O acelerador é basicamente um composto orgânico sulfúrico que age como um catalisador para o processo de vulcanização (GOULART, 1999).

2.2.3 Processos de vulcanização

Existem diversos métodos que conferem a forma definitiva dos objetos em simultâneo com o processo de vulcanização. Os artefatos de borracha podem ser vulcanizados de forma descontínua ou contínua. Os processos descontínuos contam, principalmente, com: prensas e autoclaves (aquecidos por vapor direto; aquecidos por vapor indireto; aquecidos eletricamente ou por combustão a gás). Os processos contínuos, por sua vez, consistem, principalmente, em: banho de sais; radiação de alta frequência ou micro-ondas; túnel de ar quente. Os diferentes métodos de vulcanização desenvolvidos ao longo das décadas que decorrem desde a data de sua descoberta permitem vulcanizar por meios economicamente eficientes uma pluralidade de artefatos (PIEROZAN; KOSERSKI, 2010).

Segundo Rocha et al. (2007), os métodos de vulcanização mais utilizados são:

- a) moldagem por compressão: moldagem da borracha através de pressão gerada por uma máquina hidráulica. São classificados pelo método de inserção da matéria prima, podendo ser, manual, por transferência e injeção. É muito utilizado na produção de peças técnicas, como anéis, por exemplo;
- b) moldagem por pressão interna: vulcanização de peças cilíndricas, onde o calor é transmitido para a peça através do molde externo. Na parte interna a pressão é gerada através de uma câmara de borracha (*bladder*) que comprime a peça contra as paredes do molde. Possui uma ampla gama de aplicação como na vulcanização de pneus e bolsas de suspensão;
- c) autoclave: recipiente que contém vapor sob pressão e é em formato cilíndrico. Podem ser aquecidos com vapor diretamente ou indiretamente em contato com a peça, eletricamente e com combustão de gás;
- d) banho de sais fundidos (LCM – *Liquid Curing Media*): a mistura de sais é aquecida a temperaturas da ordem dos 230 a 250 °C. O material extrudado é mantido imerso no banho de sais fundidos por meio de um conjunto de rolos. Esse processo de vulcanização permite atingir velocidades de vulcanização de 70 m/min, em linhas com 25-26 metros de

comprimento. É muito utilizado na produção de perfis em borracha, tubos e alguns tipos de mangueiras;

- e) radiação de alta frequência ou micro-ondas: aquecimento de substâncias dipolares por energia de alta frequência consiste na excitação das moléculas polares por um campo eletromagnético alternado, operando com uma alta frequência. Se um composto de borracha possuir ingredientes constituídos por moléculas polares, o composto pode ser aquecido por este processo. Ou ainda, se o composto de borracha apresentar efetivamente um determinado valor de constante dielétrica, é possível que o material atinja uma elevação da sua temperatura suficiente para que ocorra a sua vulcanização.
- f) túneis de ar quente: utilizado na vulcanização de tecidos revestidos com borracha. O tecido, depois de receber uma película de uma solução de borracha. A associação de uma zona de aquecimento por radiação infravermelha ao túnel de ar quente é uma outra forma de melhorar a sua eficácia de vulcanização. O extrudado é conduzido para o túnel de ar quente, o qual pode ser aquecido a temperaturas que variam entre 160 e 280 °C; o comprimento do túnel é variável, mas comprimentos da ordem dos 9 a cerca de 20 metros são muito usuais. A câmara de aquecimento tem uma altura de 110 mm e a largura de 220 mm. O extrudado é transportado sobre uma cinta em *teflon*, reforçada com fibra de vidro. Alguns tipos de túneis de ar quente operam num método de fluxo reverso e com um reforço de aquecimento por radiação infravermelha, um túnel de 10 a 12 metros permite obter velocidades de vulcanização da ordem de 50 metros por minuto.

2.3 EXTRUSÃO

De acordo com o site CTB, desde a descoberta da vulcanização, a preparação de compostos de borracha a serem vulcanizadas é obtida por meio da tecnologia de mistura por batelada, que utiliza misturadores internos e mastigadores. Na etapa de vulcanização, utilizava-se a moldagem por compressão para obtenção de produtos acabados. A demanda desenfreada por borracha em diversos setores intensificou a busca de um processo contínuo para a etapa de vulcanização da

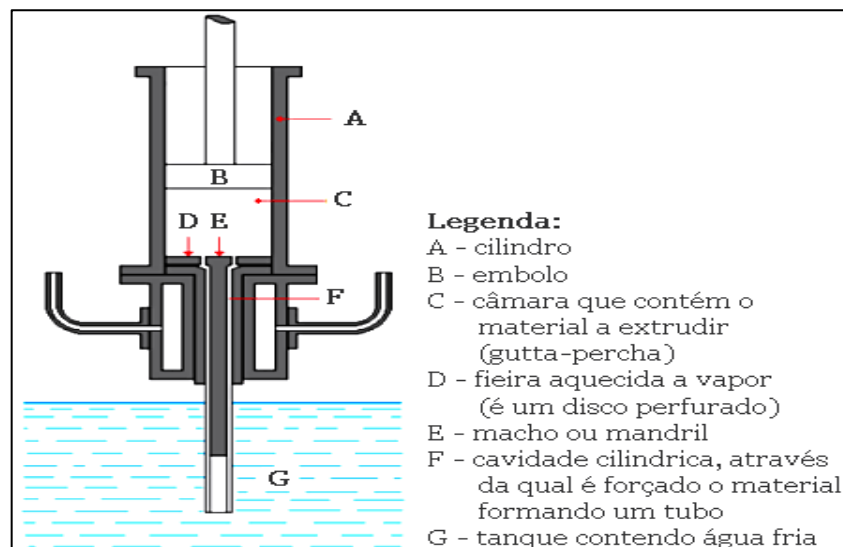
borracha, porém a etapa de preparação de compostos a serem vulcanizados ainda continuou sendo por meio de bateladas, em função da necessidade dos processos de mastigação, mistura e incorporação do sistema de vulcanização que envolve os aceleradores e o enxofre. Deste modo, o processamento contínuo desenvolvido para aplicação de compostos de borracha a serem vulcanizados, foi a extrusão.

O processo de extrusão é considerado uma das técnicas de produção mais importantes da Indústria da Borracha. Consiste em pressionar a passagem de um composto de borracha por meio de uma matriz, tendo como resultado uma tira de material cujo formato é aproximado ao do orifício da matriz. A técnica que se utiliza para forçar o composto de borracha através da matriz está na base de uma das classificações das extrusoras. Portanto, classificam-se:

- extrusoras de êmbolo: pressão necessária para forçar a passagem do composto de borracha através da matriz é produzida por um êmbolo;
- extrusoras de fuso: pressão necessária para forçar a passagem do composto de borracha através da matriz é produzida por um fuso.

As extrusoras surgiram concretamente em 1845. Eram máquinas do tipo êmbolo e foram empregadas a revestir fios condutores com gutta-percha, uma substância parecida com a borracha (*Henry Bewley e Henry Brooman*). Em 1846 foi registrada para o revestimento de cabos eléctricos por este processo (CTB, 2021). A Figura 3 mostra um desenho de uma extrusora de Bewley e Brooman.

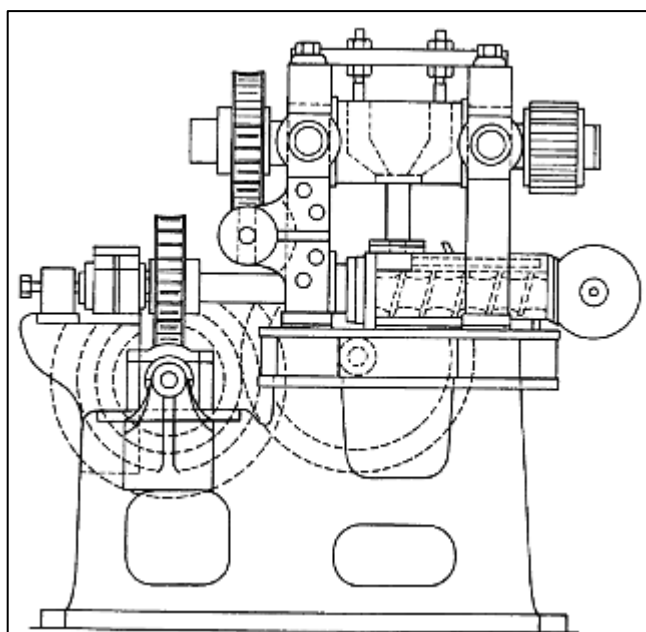
Figura 3 - Extrusora de Henry Bewley e Henry Brooman



Fonte: CTB (2021)

As extrusoras de êmbolo certificam ao processo uma condição descontínua e, por consequência, uma perda na produtividade. Em meio à circunstância, desestimula-se quando há pretensão de obter capacidade de produção. Isto resultou na procura por uma técnica que resultasse em maior capacidade de produtividade e isso fez com que surgissem as primeiras extrusoras de fuso. Em 1879 foi registrada pelo inglês *Matthew Gray*, uma extrusora de fuso que possuía dois rolos de alimentação aquecidos (CTB, 2021). A Figura 4 ilustra essa extrusora.

Figura 4 - Ilustração da primeira extrusora de fuso



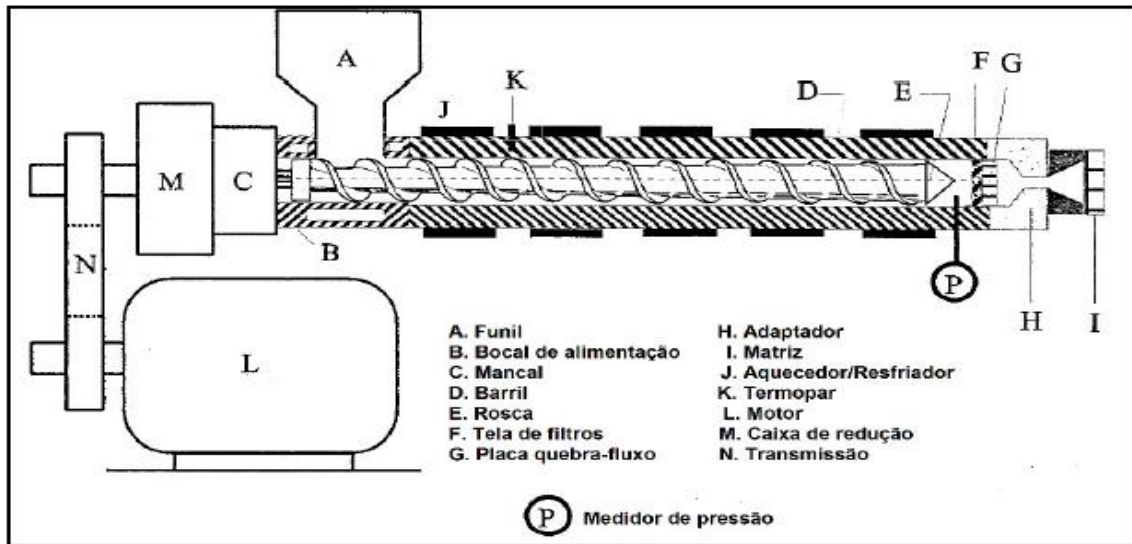
Fonte: CTB (2021)

As extrusoras foram sendo aperfeiçoadas com o tempo e atualmente dispõem-se de equipamentos altamente modernos e que permitem obter produtos com alto nível de qualidade e elevado nível de produtividade. A maioria das extrusoras utilizadas atualmente é do tipo fuso. Além dessas, existem também extrusoras do tipo êmbolo, utilizadas em operações mais específicas (RAUWENDAAL, 2014).

A extrusora de fuso, consiste em um fuso coberto por um corpo cilíndrico aquecido. A alimentação é localizada no início deste corpo cilíndrico e tem a ele acoplado o funil por onde o polímero é depositado. Um adaptador encontra-se na saída do corpo cilíndrico e a ele é anexada a matriz de extrusão. O fuso é rotacionado pelo motor que, por sua vez, tem sua velocidade reduzida e transportada através da caixa de redução e transmissão, aumentando o torque. Este

torque é transmitido da caixa de redução para o fuso através de uma chave ou de estrias no eixo do fuso (RAUWENDAAL, 2014). A Figura 5 ilustra o esquema de uma extrusora de fuso.

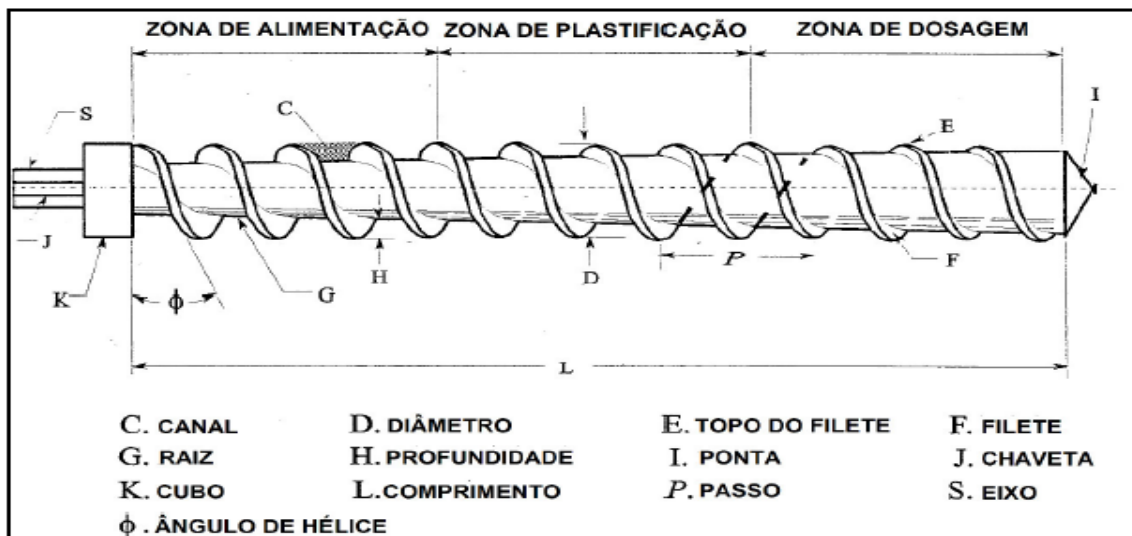
Figura 5 - Componentes típicos de uma extrusora de fuso



Fonte: Chung (2000).

O fuso é o componente mais importante do processo, sendo que o desempenho da extrusão depende da configuração deste elemento, sendo mostrado na Figura 6 detalhes de um fuso.

Figura 6 - Características geométricas de um fuso de uma extrusora



Fonte: Chung (2000)

De acordo com o site CTB (2021), buscando regular as condições de extrusão em decorrência da temperatura, o fuso, o corpo cilíndrico e a cabeça são geralmente ocos, permitindo a circulação de fluidos para aquecimento. Por isso, o material que é inserido à extrusora sofre transformações em sua temperatura, pelo contato com as paredes das várias zonas da máquina. A partir do aquecimento do composto, resulta no amolecimento ou plastificação. A plastificação acontece também pelo atrito entre o composto de borracha em movimento e as partes fixas da extrusora e pelas ações de corte do fuso.

Pode-se alimentar a extrusora com composto de borracha aquecido em misturadores abertos. Neste caso, a função da extrusora será passar o composto de borracha da matriz para obtenção do extrudado, exclusivamente. As extrusoras que desempenham este papel são chamadas de “extrusoras de alimentação a quente”. Têm como característica uma relação entre o comprimento do fuso e o seu diâmetro compreendido entre 4 e 8.

Com o objetivo de diminuir a execução e de aumentar o rendimento dos equipamentos, foram desenvolvidas as “extrusoras de alimentação a frio”. Caracterizadas por fusos mais extensos, com configuração mais complexa, que tem a função de aquecer e de plastificar o composto de borracha, além de conduzi-lo para a saída. O L/D (relação entre o comprimento do fuso e o seu diâmetro) varia geralmente entre 11 e 20. A energia consumida por este tipo de máquinas é necessariamente maior e assim o motor de acionamento terá de ser de maior potência. A velocidade de rotação do fuso das extrusoras de alimentação a frio é também variável, varia geralmente entre 20 e 100 rpm. As extrusoras de alimentação a frio podem apresentar ainda outras variações:

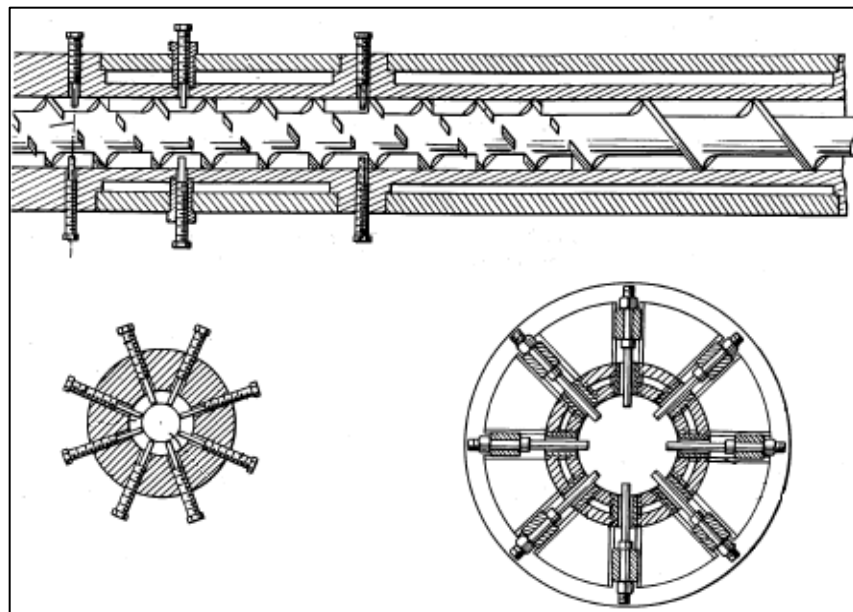
- extrusoras com ou sem zona de desgaseificação;
- extrusoras com ou sem pinos; e
- extrusoras com ou sem bomba de engrenagens.

As extrusoras de alimentação que tem zona de desgaseificação, os gases, umidade e componentes presentes no composto de borracha são anulados com a ajuda de uma bomba de vácuo. Por isso, este tipo de extrusora realiza os processos de vulcanização com baixa pressão ou mesmo sem pressão. Os produtos extrudados e vulcanizados por esta técnica são de ótima qualidade e sem porosidade. O fuso na zona de desgaseificação tem uma ideia diferente e que

promove de forma mais fácil a remoção das substâncias gasosas importunas (CHUNG, 2000).

As extrusoras com pinos foram desenvolvidas a partir do início do século XX. A aplicação da tecnologia em extrusoras para borracha foi desenvolvida no ano de 1972. A Figura 7 apresenta esse tipo de extrusora.

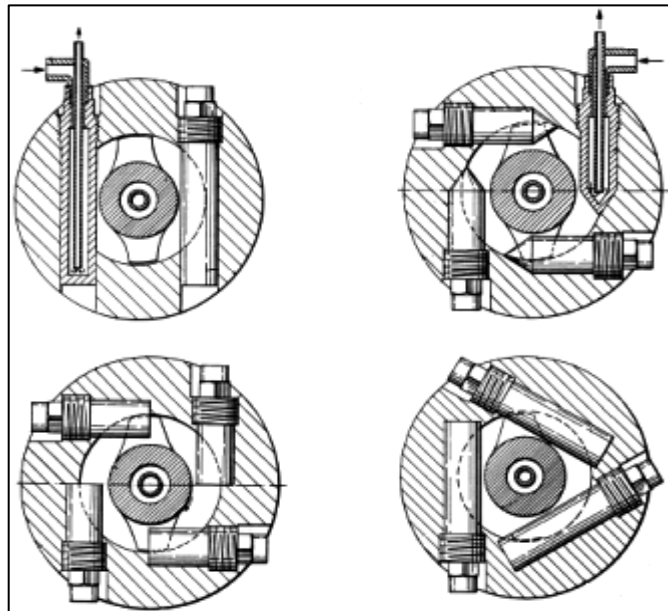
Figura 7 - Extrusora com pinos de Menges e Harms



Fonte: CTB (2021)

Desde então, realizaram-se novos desenvolvimentos. Os primeiros pinos feitos eram do tipo radial e colocados entre oito a dez planos radiais, cada um deles com seis a dez pinos, variando de acordo com as dimensões da extrusora. Uma variante foi criada com o desenvolvimento de pinos radiais com comprimentos ajustáveis. A instalação dos pinos seguiu sofrendo melhorias, resultando na concepção tangencial atual com pinos possuindo também, no seu interior, canais de arrefecimento, o que permite uma melhor regulação da temperatura (CHUNG, 2000). Na Figura 8 são identificados alguns tipos de montagem desses pinos.

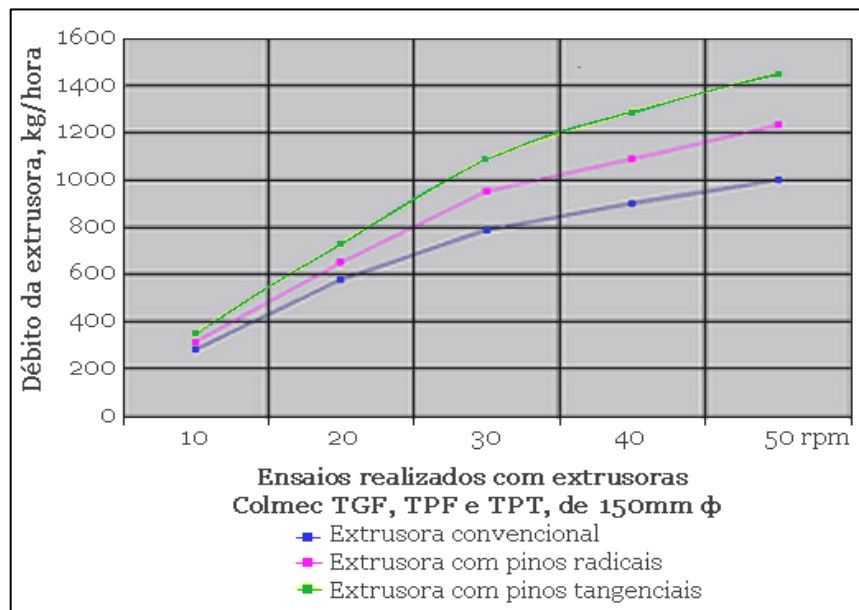
Figura 8 - Tipos de pinos tangenciais em extrusoras



Fonte: CTB (2021)

Para entender que tipo de vantagem as extrusoras pinadas tem em relação as não pinadas, a empresa *Colmec, SpA* realizou um estudo, onde é possível ver o resultado na Figura 9.

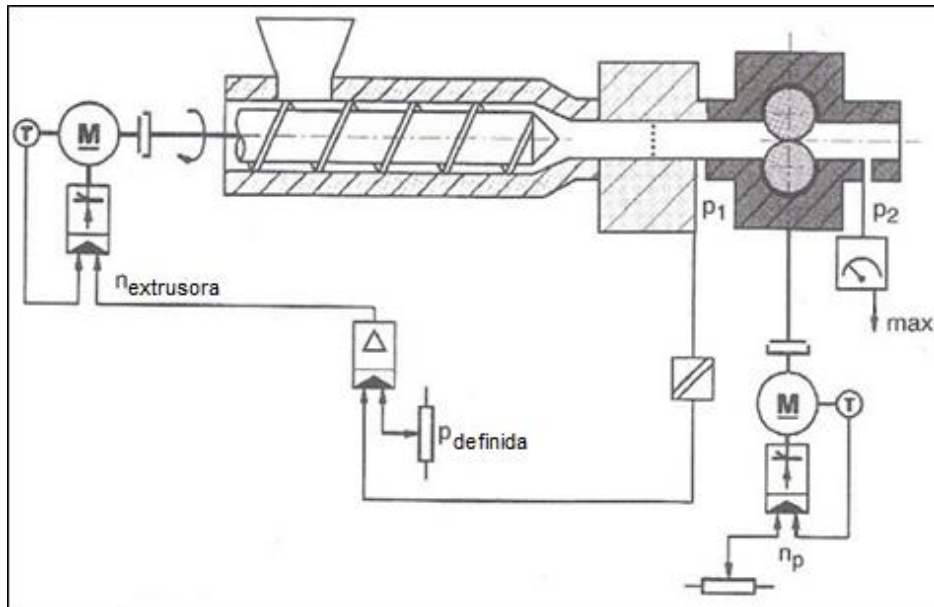
Figura 9 - Resultado do estudo da Colmec, SpA



Fonte: CTB (2021)

A combinação de uma extrusora e uma bomba de engrenagens (Figura 10) na sua extremidade, tem como objetivos a homogeneização da temperatura do composto, e com auxílio da bomba, manter a vazão e temperaturas uniformes na saída do cabeçote.

Figura 10 - Esquemática de uma extrusora com bomba de engrenagens



Fonte: Associação Brasileira de Tecnologia da Borracha (2012)

O funcionamento está baseado no fato de que a extrusora mantém a pressão antes da bomba através de um transdutor, e a bomba que possui um acionamento variável mantém a pressão após a mesma, obtendo-se desta forma, na saída do cabeçote, uma uniformidade de fluxo e de temperatura (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DA BORRACHA, 2012).

2.4 PERFIS DE VEDAÇÃO DE BORRACHA

Segundo Manrich (1999), em processamento de termoplásticos, o perfil é um produto com formato específico, obtido pelo processo de extrusão, este pode ou não ser simétrico em relação às coordenadas de referência X e Y que partem do centro do plano transversal ao comprimento do perfil. Pode-se dizer que uma peça de borracha tem o formato de perfil quando é desenvolvida de uma forma específica para servir de vedação ou acabamento em uma estrutura maior. É muito comum ver-se o perfil de borracha na indústria automotiva, por exemplo. O perfil emborrachado

serve de acabamento para amortecer o fechamento de portas, capô e porta-malas, além de outras. A figura 11 ilustra detalhes de perfis de borrachas.

Figura 11 - Perfis de Borracha



Fonte: Autotravi (2021)

Os perfis de borracha são fabricados em diferentes tipos de modelo. O padrão de desenho do perfil de borracha é concebido conforme a estrutura onde será aplicado. Normalmente, o perfil tem o formato de um cordão, justamente para ser colocado ao longo do *design* do conjunto. Pode ter estrutura esponjosa ou maciça. O tipo escolhido dependerá da finalidade desejada.

Os tipos de perfil emborrachado variam justamente com os tipos de borracha. Assim como lençóis de borracha, é possível encontrar os modelos nitrílica, EPDM, SBR, silicone e Viton. Dependendo da demanda, outros tipos de borracha também podem ser usados.

A escolha do tipo de borracha dependerá da destinação do perfil. A borracha nitrílica é uma das mais usadas justamente por sua forte aderência na indústria automobilística. Sua resistência a combustíveis é ideal para o cenário das montadoras. Da mesma forma, outros tipos como EPDM e SBR têm suas respectivas características.

3 DESENVOLVIMENTO

Com o crescimento da empresa Autotravi, notou-se a necessidade de implementar melhorias no desempenho dos processos já existentes. Na tentativa de acelerar o projeto de melhorias, iniciou-se com o manejo de maneira correta das máquinas e equipamentos que a empresa já dispunha, além de alguns novos investimentos. A partir da realização deste trabalho de conclusão de curso, foram implantadas: melhorias estruturais; melhorias de parâmetros de trabalho; melhorias de processo.

A proposta inicial era que todos os aperfeiçoamentos fossem realizados na mesma linha de produção para que o resultado final se fizesse o mais significativo possível. Porém, por decisão da empresa, não foi possível dedicar-se apenas em uma mesma linha. Sendo assim, os resultados de cada melhoria são apresentados individualmente, para que seja identificado uma melhor visualização de ganhos.

3.1 PROCESSO PRODUTIVO

A empresa Autotravi possui em suas linhas de produção um processo que utiliza extrusoras a frio e túneis de ar quente para realizar a fabricação de seus perfis de borracha. Seus parâmetros de trabalho são empíricos, ou seja, através dos anos, vem-se trabalhando para obter melhores padrões de produção possíveis.

Conta-se com oito linhas de produção específicas para o tipo de produto fabricado, sendo eles: produtos de composto maciço, produtos de composto esponjoso e produtos de bielastômero (onde são utilizados os dois compostos juntos). Do total das oito linhas, três são dedicadas a produzir bielastômero; três de composto maciço e duas de composto esponjoso. Cada linha é identificada por um código interno, onde a identificação e o tipo de produto produzido podem ser visualizados no Quadro 2.

Quadro 2 - Código da linha e tipo do produto

Código da linha	Tipo de produto
167	Bielastômero
155	Bielastômero
203	Espojoso
430	Maciço
185	Bielastômero
414	Maciço
314	Espojoso
416	Maciço

Fonte: O Autor (2021)

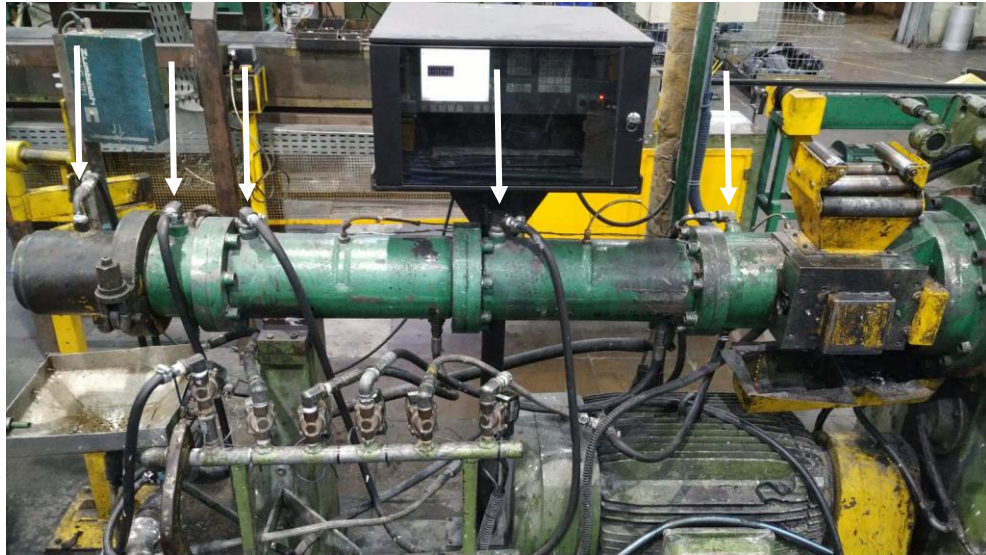
3.1.1 Extrusoras

As linhas de produção que atuam com compostos maciços ou esponjosos utilizam apenas uma extrusora, já as linhas de produtos de bielastômeros, utilizam uma extrusora por composto, totalizando onze extrusoras em oito linhas de produção. Vale ressaltar que as extrusoras foram adquiridas pela empresa em momentos diferentes, sendo assim, são de marcas e modelos diferentes, porém com funcionamentos semelhantes.

As extrusoras da empresa Autotravi são caracterizadas por serem “a frio”, ou seja, trabalham com o composto resfriado. Os compostos utilizados vão para a linha em formato de tiras e em temperatura ambiente, porém, para uma melhor fluidez, compactação e menor força na moldagem na matriz, o composto deve ser aquecido. O aquecimento se dá no interior da extrusora, normalmente pelo atrito causado por ele mesmo, devido à rotação do fuso. Apenas uma extrusora conta com aquecimento via sistema automático, onde faz circular água quente em seu interior.

Todas as extrusoras contam com um sistema de refrigeração. Funciona como uma câmara entre as paredes externa e interna do corpo que, quando acionado, faz circular água nas câmaras a fim de reduzir a temperatura da máquina. As zonas de refrigeração são todas definidas em projeto. São cinco zonas de refrigeração, sendo uma no cabeçote, uma no flange que une cabeçote e canhão, duas no canhão e uma no rolo alimentador. Algumas máquinas podem ter divisões um pouco diferentes do padrão. Um exemplo das divisões de refrigeração pode ser visto na Figura 12, onde cada intervalo da máquina tem uma mangueira do sistema de refrigeração.

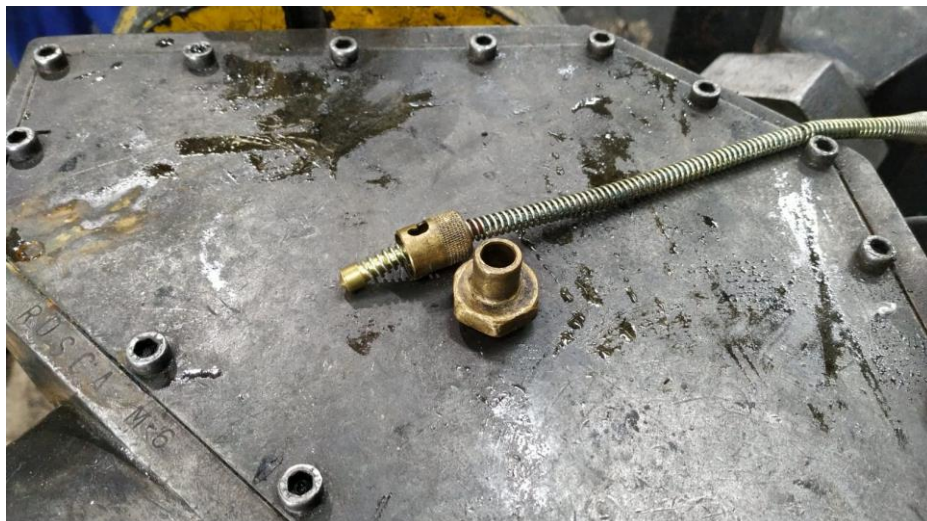
Figura 12 - Divisões das refrigerações



Fonte: O Autor (2021)

Cada zona de refrigeração conta com um termopar do tipo K, que faz comunicação com o sistema de controle de temperatura da máquina. Quando atinge a temperatura máxima atribuída para a zona, envia um comando para o CLP que faz a abertura da válvula solenoide. A temperatura medida pelo termopar é a temperatura que o adaptador atinge. O adaptador fica em contato com a água da câmara de refrigeração e com a estrutura da máquina e o termopar fica em contato direto com o adaptador. A montagem do termopar montado no cabeçote da extrusora pode ser vista na Figura 13.

Figura 13 - Montagem de um termopar no cabeçote da extrusora



Fonte: O Autor (2021)

3.1.2 Túneis de ar quente

Em cada linha de produção existe um túnel de ar quente para realizar a vulcanização dos perfis. Todos os túneis são de fabricação interna, sendo diferentes uns dos outros. Cada um deles têm medidas de largura, altura, comprimento e quantidade de módulos, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensões dos túneis de ar quente

Linha de produção	Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento (m)	Quantidade de módulos
167	110	80	26,5	8
155	110	70	26,5	8
203	140	80	32	10
430	160	90	32	10
185	110	75	32	10
414	140	80	32	10
314	120	80	32	10
416	140	80	28,5	9

Fonte: O Autor (2021)

Os túneis de todas as linhas de produção são divididos em módulos. Cada módulo possui 3 m de comprimento, e no centro da face superior fica localizado o termopar responsável pela medição das temperaturas internas. Há módulos que têm cavidades para até quatro resistências, sendo elas: duas na parte superior e duas na inferior. Há também módulos que contam com cavidades para até oito resistências – com resistência em todas as posições. Podem-se visualizar os diferentes módulos nas Figuras 14 e 15, onde cada caixa amarela representa uma resistência elétrica.

Figura 14 - Módulo para até quatro resistências elétricas



Fonte: O Autor (2021)

Figura 15 - Módulo para até oito resistências elétricas



Fonte: O Autor (2021)

Os módulos são constituídos de uma estrutura externa. Logo abaixo há uma vedação de fibra cerâmica com uma camada de alumínio. Por fim, há duas paredes de aço e dentre essas se encontra um espaço, onde ficam posicionadas as resistências elétricas. Observa-se na Figura 16, a cavidade feita na primeira parede

de aço, onde é posicionada a resistência elétrica e na figura 17 é possível observar a fibra cerâmica utilizada para auxiliar no isolamento térmico.

Figura 16 - Cavidade para posicionamento da resistência



Fonte: O Autor (2021)

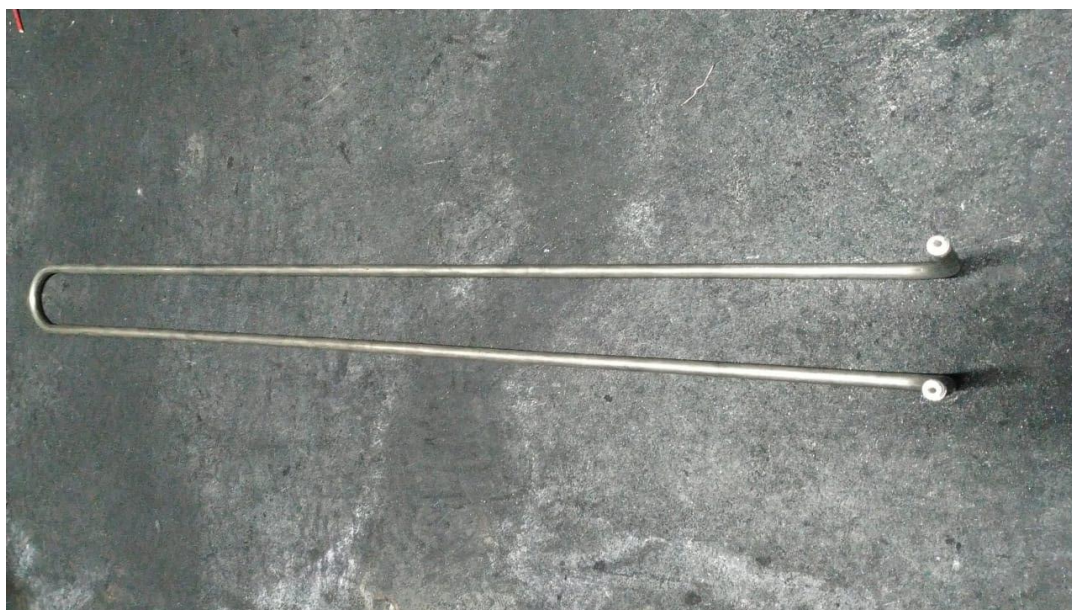
Figura 17 - Isolamento de fibra cerâmica com uma camada de alumínio



Fonte: O Autor (2021)

A empresa tinha como padrão resistências elétricas tubulares, em formato de U (Figura 18) com potência 2500 W. No entanto, é possível encontrar, eventualmente, resistências de 2000 W e 3000 W. O novo padrão implantado foi de resistências elétricas planas, e a sua potência definida com o término dos testes.

Figura 18 - Resistencia elétrica tubular em formato de U



Fonte: O Autor (2021)

Entre os módulos existem juntas, com a finalidade de mantê-los unidos. Conta-se com dois tipos de juntas: solda entre dois módulos ou uma “porta” soldada entre os módulos. A porta serve para favorecer o acesso fácil aos módulos, propiciando a limpeza, manutenção e eventual diminuição das temperaturas dos túneis. Na Figura 19 pode-se ver uma junta soldada entre módulos, já na Figura 20 é visualizada uma junta através de uma porta soldada entre os módulos.

Figura 19 - Junta soldada entre módulos



Fonte: O autor (2021)

Figura 20 - Porta soldada entre dois módulos



Fonte: O autor (2021)

3.1.3 Sistema controlador de temperatura Interação Homem-Máquina (IHM)

Todas as linhas de produção contam com um sistema controlador de temperatura, chamado internamente de IHM – interação homem-máquina – que faz a gestão das temperaturas do túnel de vulcanização (capaz de controlar até dez zonas) e da máquina extrusora (capaz de controlar até oito zonas).

No túnel de vulcanização, o sistema funciona como um acionador das resistências elétricas. O termopar faz a medição da temperatura no interior do túnel, em seguida envia um sinal ao sistema, o qual compara com o alvo previamente atribuído. Caso a temperatura medida esteja mais baixa que o alvo, a resistência é acionada.

Na máquina extrusora, o termopar faz a medição e a comparação com o alvo atribuído. Caso a temperatura esteja superior ao alvo, o sistema envia um sinal para que a válvula solenoide abra, acionando a refrigeração. Já, na extrusora da linha 414 – que possui sistema de aquecimento e refrigeração –, o sistema envia sinais diferentes para o CLP, derivando da temperatura medida, seja ela maior ou menor que o alvo, identificando qual válvula solenoide deve abrir.

Em cada zona é possível atribuir um alvo, de forma individual, formando a rampa de temperaturas desejada. No painel do sistema controlador é possível visualizar a temperatura medida, identificada com PV (*Process Variable*), e a temperatura alvo, identificada como SV (*Setpoint Value*), de todas as zonas. Na Figura 21 é possível visualizar o painel do sistema IHM.

Figura 21 - Painel do IHM



Fonte: O Autor (2021)

3.1.4 Parâmetros de trabalho

Nas linhas de produção da empresa Autotravi é possível definir como parâmetros de trabalho: a velocidade da esteira do túnel de vulcanização; a rotação (em RPM) do fuso da extrusora; e as temperaturas da extrusora e do túnel. Todos

estes parâmetros são estabelecidos pela engenharia de produto durante o desenvolvimento do perfil, geradas na fase de testes do produto. Os parâmetros de trabalho são individuais de perfil para perfil e são muito importantes, pois compõem o custo final de produção.

Todos os perfis têm velocidades de esteira próprias, controladas por um inversor de frequência. O RPM do fuso é um parâmetro que controla a quantidade de composto extrudado, porém, no processo atual, não é possível padronizar esse parâmetro, devido às variações de características de cada lote de um mesmo composto. Para controlar a quantidade de composto extrudado, é utilizada uma cota de referência, de suma importância, pois faz as compensações necessárias, em virtude de algumas misturas expandirem durante o processo de vulcanização.

As temperaturas também passaram por um processo de padronização, onde foram geradas duas faixas para cada tipo de produto, sendo que cada faixa tem alvos diferentes, definidos pela engenharia de produto.

3.2 O PROBLEMA DE DESEMPENHO NA PRODUÇÃO

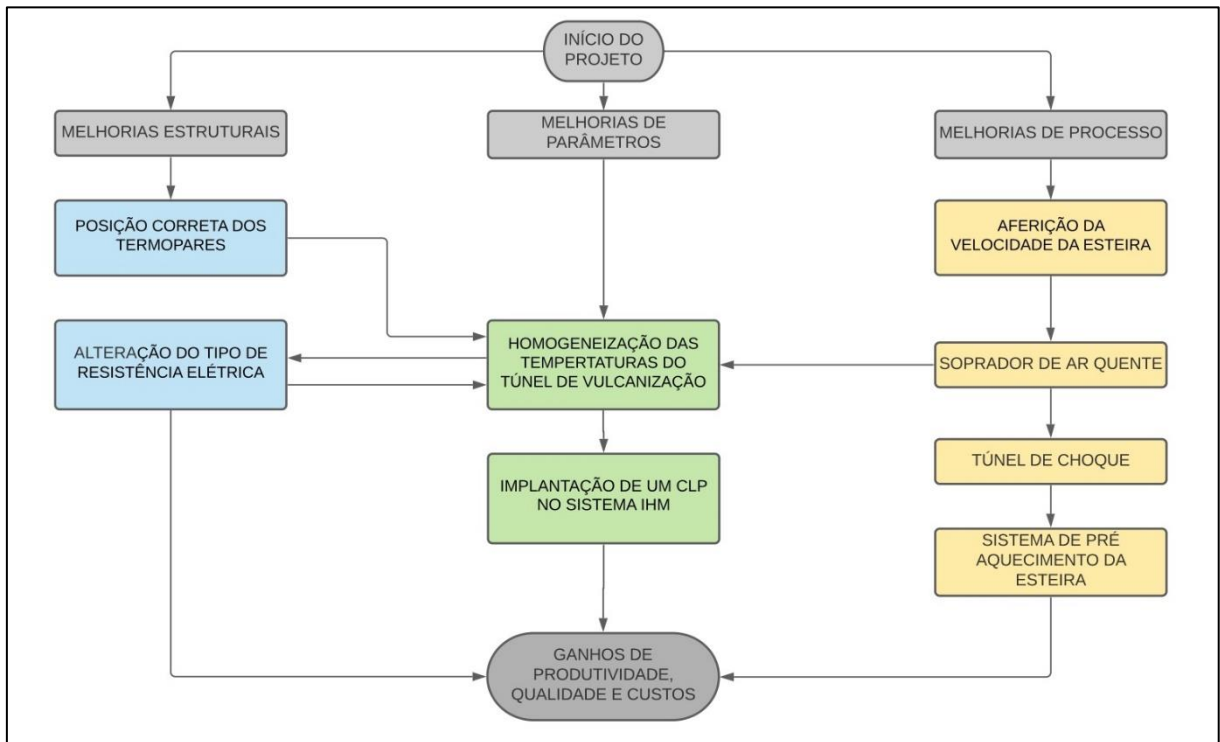
A partir da padronização dos processos, inicialmente foram gerados parâmetros de trabalho a serem seguidos, tais como: temperatura da extrusora, cota de referência, temperatura do túnel de vulcanização e velocidade da esteira do túnel de vulcanização. A partir do uso desses parâmetros iniciou-se as coletas de dados, para avaliá-los e melhorá-los a fim de obter melhores condições de trabalho.

Com a criação de parâmetros, objetivando padronizar a operação da produção, percebeu-se que o processo estava ganhando maior estabilidade, porém, perdendo produtividade. Em muitos casos, a produção não estava atingindo as velocidades definidas nos processos.

Foi vista a situação então como uma oportunidade de realizar algumas melhorias para buscar maior estabilidade no processo e também melhoria na produtividade. Foram sugeridas algumas ideias de baixo investimento que poderiam ser realizadas e que poderiam causar algum ganho.

O fluxograma da Figura 22 apresenta a sequência de atividades que culminou na realização desse trabalho.

Figura 22 - Fluxograma das atividades propostas



Fonte: O Autor (2021)

3.3 INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo são mostrados os equipamentos utilizados para realizar as melhorias propostas.

3.3.1 Datalogger

Para realizar as medições das temperaturas internas dos túneis de vulcanização foi necessário utilizar um aparelho *datalogger* modelo TH-096, da marca Instrutherm. Com o auxílio de um termopar, o *datalogger* faz a captação das temperaturas ao longo do tempo e guarda todos dados em uma tabela em formato XLS, de onde é possível extraí-los e gerar um gráfico.

O termopar utilizado é tipo K, que tem sua faixa de utilização entre -50 °C e 750 °C. Esse termopar é acoplado ao *datalogger* com resolução de 1°C e realiza uma coleta de temperatura por segundo, gerando uma tabela tempo x temperatura. O modelo utilizado é ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - *Datalogger* utilizado para medição das temperaturas dos túneis



Fonte: Instrutherm (2021)

3.3.2 Tacômetro

Para realizar as medições das velocidades das esteiras dos túneis de vulcanização, foi utilizado um tacômetro modelo MDT-2238B, da marca Minipa, com resolução de 1 RPM. Esse tacômetro realiza medições de velocidade em metros por minuto ou rotações por minuto. As medições foram feitas por contato direto com a esteira, através de uma pequena polia que fica acoplada no eixo do tacômetro. O tacômetro utilizado é mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Tacômetro utilizado para medição das velocidades das esteiras



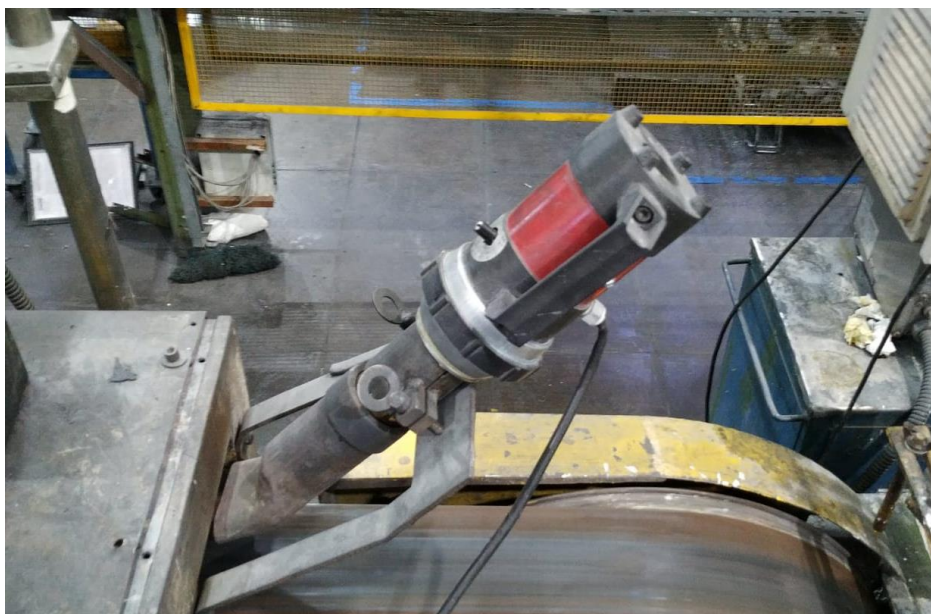
Fonte: O Autor (2021)

3.3.3 Soprador de ar quente

Para gerar movimentação de ar no interior do túnel, foi utilizado um soprador de ar quente, com movimentação de ar de forma axial, com uma resistência elétrica interna com uma potência de 4000 W. O soprador foi adquirido junto a uma empresa de suprimentos industriais e não apresenta descrição de modelo e marca.

Para fixar o soprador na entrada do túnel de vulcanização, foi produzido internamente um suporte para posicioná-lo de forma que todo ar quente soprado entrasse diretamente no túnel. Pode-se visualizar na Figura 25 o soprador já no instalado no suporte.

Figura 25 - Soprador de ar quente para movimentação do ar



Fonte: O Autor (2021)

3.3.4 Termômetro de mira a laser

Para as demais medições de temperatura, utilizou-se um termômetro de mira a laser modelo GM400, da marca IFINY, com resolução de 0,1 °C.

3.4 MELHORIAS ESTRUTURAIS

Onde houve alterações físicas em meio ao processo, considerou-se “melhoria estrutural”. A alteração do tipo de resistência elétrica e posicionamento mais adequado dos termopares foram agrupados a essa melhoria.

3.4.1 Posição correta dos termopares

Os túneis de vulcanização, onde os termopares encontram-se centralizados em cada módulo, não sofreram alteração em suas posições, uma vez que as mesmas foram definidas em projeto. A alteração realizada foi referente à profundidade do termopar. Os furos onde se localizavam os termopares eram diferentes, alguns eram passantes até o interior do túnel e outros eram não passantes, o que gerava um maior erro na medição. Para solucionar ou diminuir esses erros de medição, realizou-se um trabalho de perfuração dos módulos, para que todos os furos fossem passantes e os termopares ficassem na parte interna do túnel.

Nas extrusoras, os termopares não sofreram alterações, já que as posições foram definidas no projeto de desenvolvimento da máquina. O termopar fica em contato com o seu adaptador, que, por sua vez, está em contato com a água da câmara de refrigeração, não alterando sua profundidade.

3.4.2 Alteração do tipo de resistência elétrica

Por conta de seu formato, as resistências tubulares não eram consideradas ideais para o processo, já que geram calor para todas as direções, tendo uma área de contato reduzida às paredes internas do túnel. Juntamente com o problema de geração de calor, também foram encontrados problemas com os isolamentos, que resultantes do tempo de uso, estavam desgastados e danificados, fazendo com que o túnel de vulcanização trocasse calor também com o ambiente.

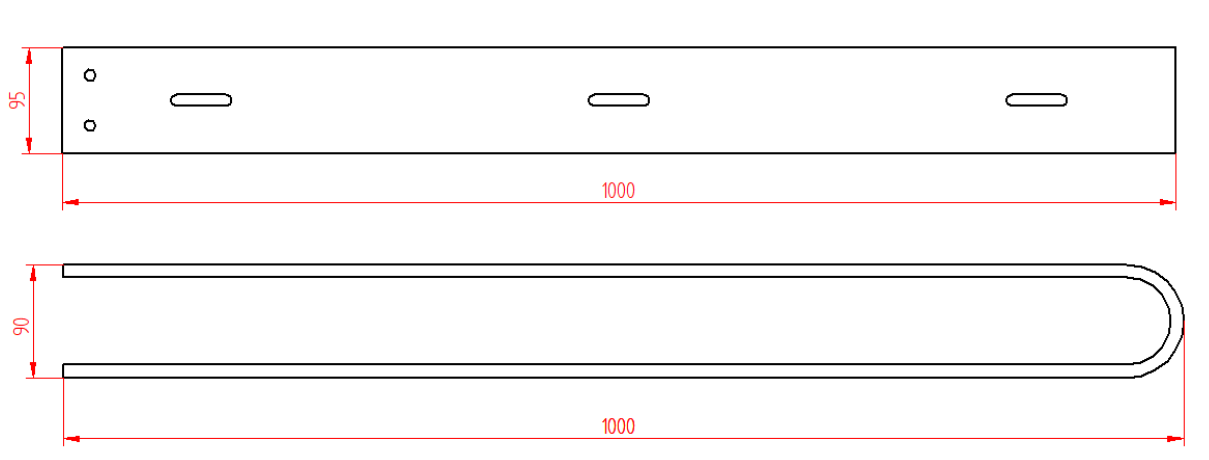
Os problemas causados pela deficiência desse modelo de resistência, eram basicamente a demora para atingir as temperaturas desejadas e o não atingimento das mesmas. Os túneis demoram, aproximadamente, de três a quatro horas para

atingir a temperatura máxima ou desejada, o que prejudicava a produtividade no período após o túnel de vulcanização ser ligado.

Pensando nisso, foi desenvolvido juntamente com uma empresa fabricante de resistências elétricas, um modelo de resistência plana. As medidas foram aproximadas das resistências tubulares, para alterar o mínimo possível a fixação a fim de facilitar a instalação das mesmas. A escolha pelas resistências elétricas em um formato plano se deve pela maior área de contato entre a resistência elétrica e a superfície da parede interna do túnel de vulcanização, sendo possível transmitir maior quantidade de calor em um mesmo período de tempo que as resistências elétricas tubulares.

A fixação da resistência tubular era feita por meio de uma chapa parafusada, já a resistência plana é fixada por parafusos através de furos pré-projetados. A comparação dimensional pode ser visualizada na Figura 26.

Figura 26 – Comparação dimensional entre as resistências elétricas



Fonte: O Autor (2021)

A potência utilizada como padrão das resistências tubulares era de 2500 W e foi mantida para as resistências planas.

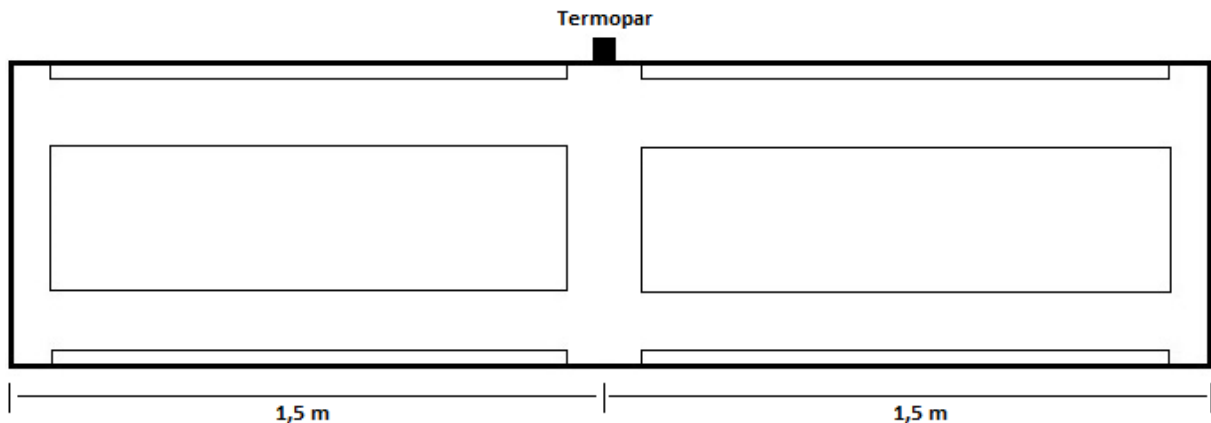
3.5 MELHORIAS DE PARÂMETROS DE TRABALHO

Executou-se um trabalho de medição das temperaturas do túnel internamente com o auxílio de um *datalogger*, que serviram para verificar a diferença entre as temperaturas medidas pelos termopares e as temperaturas reais, podendo ser feita a homogeneização.

3.5.1 Homogeneização das temperaturas do túnel de vulcanização

A forma da construção dos túneis de vulcanização e a quantidade máxima de termopares faz com que os termopares fiquem com no mínimo 3 m de distância um do outro. Nesses intervalos ficam dois conjuntos de resistências e não era possível saber qual a temperatura no local. Decidiu-se, conseqüentemente, que as temperaturas seriam averiguadas com o auxílio do *datalogger*. Na Figura 27 pode ser visto o esquema de um módulo.

Figura 27 - Esquema de um módulo do túnel



Fonte: O Autor (2021)

Para realizar as medições como padrão, a fim de realizar comparativos, foi definido um processo para a medição das temperaturas. As medições foram realizadas todas no período da tarde, para que as temperaturas dos túneis de vulcanização já estivessem estabilizadas. O termopar era inserido um metro e meio dentro do túnel e mantido, aguardando a temperatura medida estabilizar. Após estar estável era iniciada a medição. A velocidade da esteira deveria ser sempre cinco metros por minuto, para ser graficamente possível identificar as posições das temperaturas.

A partir das primeiras medições foi possível observar que haviam três situações que caberiam melhorias: as temperaturas mostradas no painel do sistema de controle não eram as reais do interior do túnel; as temperaturas dos túneis tinham um comportamento senoidal, onde eram mais quentes nos locais onde havia resistências e mais frios onde haviam termopares; o primeiro módulo não atingia a temperatura alvo.

Dessa forma, foi possível realizar ajustes para buscar as temperaturas alvo de forma real, padronizando as temperaturas internas dos túneis, independente das suas dimensões e buscando diminuir o comportamento senoidal das mesmas ao longo do túnel.

3.5.2 Implantação de um CLP no sistema IHM

O sistema controlador de temperaturas (IHM) tem um problema de atraso no processamento das informações que é muito prejudicial para o processo. O tempo que um termopar demora entre duas leituras é de dezessete segundos, um tempo consideravelmente alto para um sistema utilizado para regular as temperaturas de túnel de vulcanização e de uma extrusora.

Quando um dos termopares localizado na extrusora registra que a temperatura medida está igual ou superior a temperatura alvo, o IHM manda um sinal para o CLP, que faz a abertura da válvula solenoide e inicia a refrigeração. O problema aparece durante essa refrigeração, como o atraso de processamento do IHM é de dezessete segundos, significa que a válvula fica os mesmos dezessete segundos aberta, o que faz com que a temperatura da zona refrigerada caia aproximadamente 35 °C. Essa queda brusca de temperatura causa variações dimensionais nos perfis, principalmente em perfis de formato maior, já que a temperatura do composto no interior da extrusora baixa junto com a temperatura da máquina, diminuindo a fluidez na matriz.

A primeira tentativa de uma resolução foi buscar um sistema mais moderno, que possibilitasse um processamento de dados mais rápido, tornando viável diversas melhorias no controle das temperaturas. Porém, o alto custo de um novo sistema impediu essa mudança.

Com a impossibilidade de alteração do sistema, foi planejada uma alteração direta na programação do controlador lógico programável, em que fosse alterado o tempo de abertura da válvula solenoide. Durante a execução descobriu-se que o CLP do sistema era bloqueado, não podendo ser alterada a programação e por esse motivo foi preciso instalar um segundo CLP intermediário, que ficou posicionado entre o controlador lógico programável do sistema e as válvulas solenoides. O CLP intermediário foi programado de maneira que, quando recebe o sinal do CLP do sistema, envia sinais com tempos controlados de abertura e fechamento da válvula,

reduzindo assim as temperaturas de forma branda, diminuindo as variações dimensionais causadas pelas quedas de temperatura. Até o final do presente trabalho, foi realizada essa alteração em duas linhas de produção, e ambas demonstraram uma melhora no mantimento do dimensional.

3.6 MELHORIAS DE PROCESSO

As melhorias de processo são as que não alteram diretamente a extrusora e o túnel de vulcanização. Aferição da velocidade da esteira do túnel de vulcanização, utilização de um túnel de choque entre a extrusora e o túnel de vulcanização, utilização de um soprador de ar quente no túnel de vulcanização e pré-aquecimento da esteira foram as atividades desempenhadas nessa melhoria.

3.6.1 Aferição da velocidade da esteira

As esteiras dos túneis são controladas por um inversor de frequência, que mostra um valor no painel, tratado anteriormente como “velocidade da esteira”, porém o valor mostrado na tela é referente à uma frequência. Com o auxílio de um tacômetro foram realizadas medições e ajustaram-se os valores de frequência até que se aproximassem ao máximo da velocidade. Verificam-se os valores encontrados, e posteriormente ajustados na Tabela 2.

Tabela 2 - Erros nas velocidades das esteiras

Linha de vulcanização	Velocidade do painel (m/min)	Velocidade aferida (m/min)	Erro (%)
Linha 155	8,86	8,48	-4%
Linha 167	10,75	13,26	23%
Linha 185	5,37	5,03	-6%
Linha 203	4,86	4,99	3%
Linha 314	4,84	4,99	3%
Linha 414	5,15	4,99	-3%
Linha 416	7,87	8,35	6%
Linha 430	4,67	5	7%

Fonte: O Autor (2021)

Esses ajustes eram necessários em razão de que a velocidade da esteira do túnel de vulcanização é um parâmetro importante para o processo e acarretaria na interferência em outras melhorias.

3.6.2 Operação com o soprador de ar quente

Visto que os túneis transmitem o calor para os perfis por convecção, a movimentação do ar no interior do túnel de vulcanização é de suma importância. No interior do túnel de vulcanização havia ar resultante da movimentação da esteira e do perfil. Uma maior movimentação de ar serve para auxiliar na homogeneização das temperaturas, já que internamente diminuiria o comportamento senoidal, pois movimentaria o calor das zonas mais quentes, onde estão localizadas as resistências, para as zonas mais frias, onde estão localizados os termopares.

Para realizar essa movimentação de ar, usou-se um soprador de ar quente posicionado na entrada do túnel. Foi utilizado em potência máxima para movimentar o ar pela maior extensão possível e para diminuir a perda calorífica na primeira parte. A Figura 28 ilustra a conexão do soprador de ar quente ao túnel.

Figura 28 – Soprador de ar quente instalado



Fonte: O autor (2021)

3.6.3 Túnel de pré-choque

Entre a extrusora e o túnel de vulcanização há um espaço de aproximadamente dois metros que normalmente é preenchido por uma esteira, que serve exclusivamente para auxiliar no transporte até a entrada do túnel. Os perfis de composto maciço são extrudados a uma temperatura de aproximadamente de 80 °C, e a menor temperatura de entrada do túnel de vulcanização é de 180 °C. Essa diferença de temperatura gera uma perda calorífica do túnel, já que o perfil precisa de mais calor para entrar em equilíbrio com o túnel. Em alguns túneis, o primeiro módulo não possuía capacidade de manter a temperatura definida e, com a finalidade de diminuir essa diferença de temperatura e buscar um melhor desempenho do primeiro módulo, foi utilizado um túnel de pré-choque. Esse túnel funciona como o túnel de vulcanização, mas com uma temperatura mais elevada, em busca de ganho de calor mais rápido.

O túnel de pré-choque tem 1,5 m de comprimento e o bocal de 170 x 100 mm, utilizando dez resistências infravermelhas de cerâmica de 650 W cada, e para transportar os perfis conta com roletes de aço. O túnel de pré-choque pode ser visualizado na Figura 29.

Figura 29 - Túnel de pré-choque



Fonte: o Autor (2021)

Após alguns dias de testes, surgiu um problema que impossibilitou a utilização até a finalização do trabalho. Os roletes de aço acabavam dilatando com o calor e paravam de girar, o que gerava um maior atrito com o perfil e acabando por danificá-lo. Tentou-se buscar soluções, mas todas sem sucesso. A solução recomendada pelo fornecedor do túnel de pré-choque, foi a utilização de roletes de ligas de tungstênio, porém não foi possível obtê-los até o momento.

3.6.4 Túnel de pré-aquecimento da esteira

A esteira do túnel de vulcanização transporta o perfil pelo interior do túnel durante toda sua extensão. Quando chega ao final do túnel, faz o retorno por baixo do mesmo, em contato com o ambiente, e acaba por perder todo calor ganho no trajeto. O ciclo se repete ao voltar para o início do túnel.

O túnel de pré-aquecimento da esteira tem a finalidade similar ao do túnel de pré-choque, porém, é responsável por diminuir o volume de calor que a esteira precisará absorver quando entrar no túnel de vulcanização. O seu funcionamento é semelhante a um módulo do túnel, porém, conta com apenas duas resistências elétricas tubulares em formato de U, com potência de 2500 W cada. A temperatura interna é controlada pelo mesmo sistema de controle de temperaturas do túnel de vulcanização. O túnel apresenta um comprimento de 3 m e fica localizado abaixo do primeiro módulo do túnel de vulcanização, ficando próximo possível a entrada desse.

Com o túnel de pré-aquecimento da esteira montado, testaram-se temperaturas de forma crescente até que fosse encontrado um limite, sendo esse de 190 °C, não sendo possível aumentar mais dado a capacidade de geração de calor das resistências elétricas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

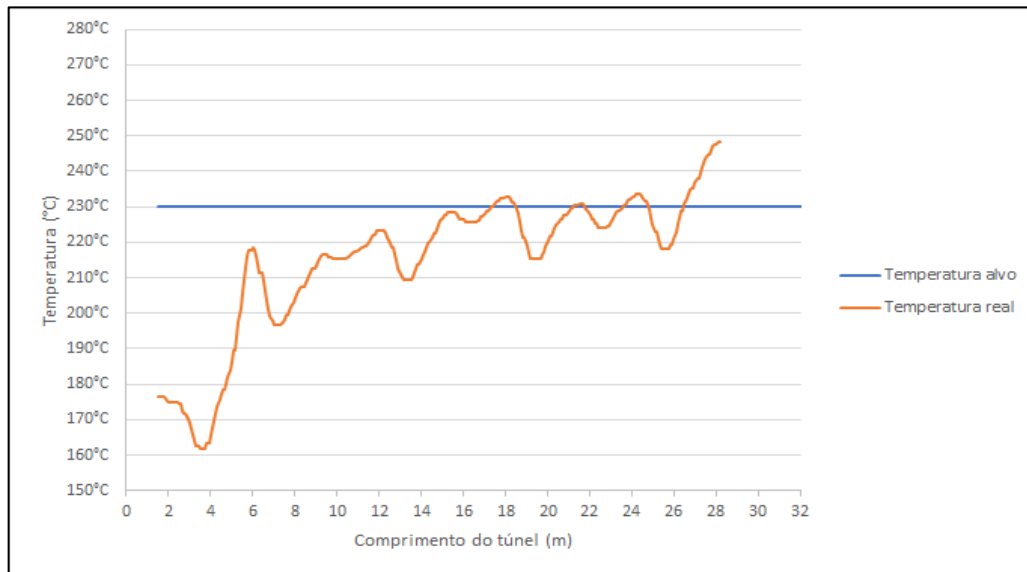
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através das melhorias realizadas, bem como a discussão desses resultados.

4.1 HOMOGENEIZAÇÃO DAS TEMPERATURAS DO TÚNEL DE VULCANIZAÇÃO

Logo nas primeiras medições, foi possível verificar que as temperaturas do painel eram diferentes daquelas alvo, diferença essa causada pelo sistema utilizado, não sendo possível parametrizar de forma que a medição e a amostragem fossem iguais. Então a diferença entre a temperatura do painel e a temperatura real permaneceu no processo e as alterações foram feitas nessa condição, dando foco à temperatura real e desconsiderando a diferença visual.

A condição citada anteriormente causava uma diferença entre a temperatura real e a temperatura alvo, já que a parametrização do sistema era feita com base no alvo e a temperatura real não atendia o sistema. Na Figura 30 é possível observar o comportamento de uma curva de temperatura real em relação à uma temperatura alvo de 230 °C. A linha utilizada nessa amostragem é a de código 203, que produz perfis fabricados com compostos esponjosos e apresentam temperatura de vulcanização em torno de 230 °C. Foram realizadas um total de 12 alterações na linha 203 até atingir o resultado final e a cada alteração foi realizada uma medição.

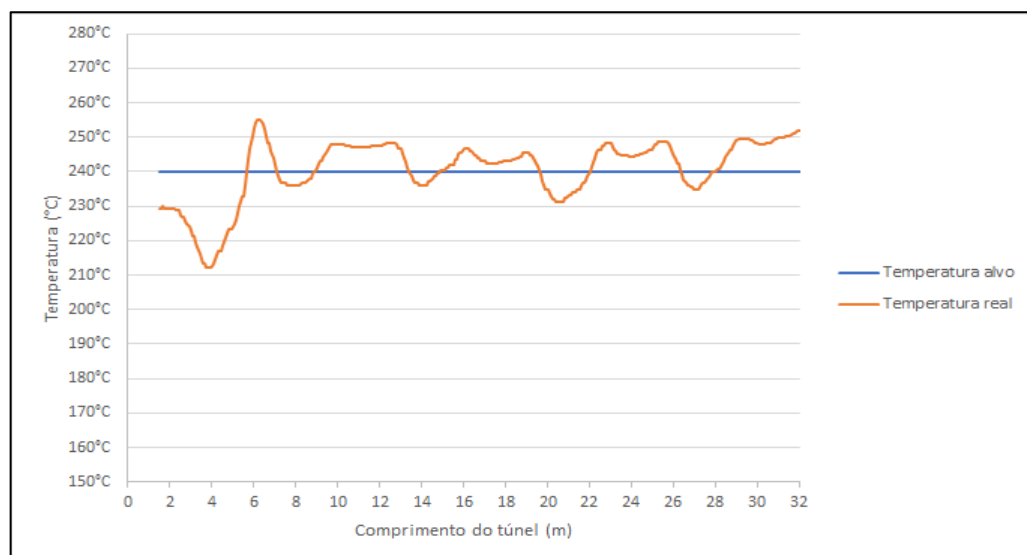
Figura 30 - Primeira medição de temperaturas da linha 203



Fonte: o autor (2021)

Após diversas alterações no SV das temperaturas do sistema, a curva foi se aproximando do alvo. O comportamento da curva continuou senoidal e foi entendido que apenas realizando ajustes nos sistemas não acarretaria em mudar esse comportamento. Foi então aceita a variação de aproximadamente ± 10 °C, pois não prejudicava a velocidade de produção definida e não alterava a qualidade do produto, sendo assim então foi homologada uma faixa com a temperatura alvo. A curva final alcançada pode ser visualizada na Figura 31.

Figura 31 - Curva de temperatura final da linha 203



Fonte: O autor (2021)

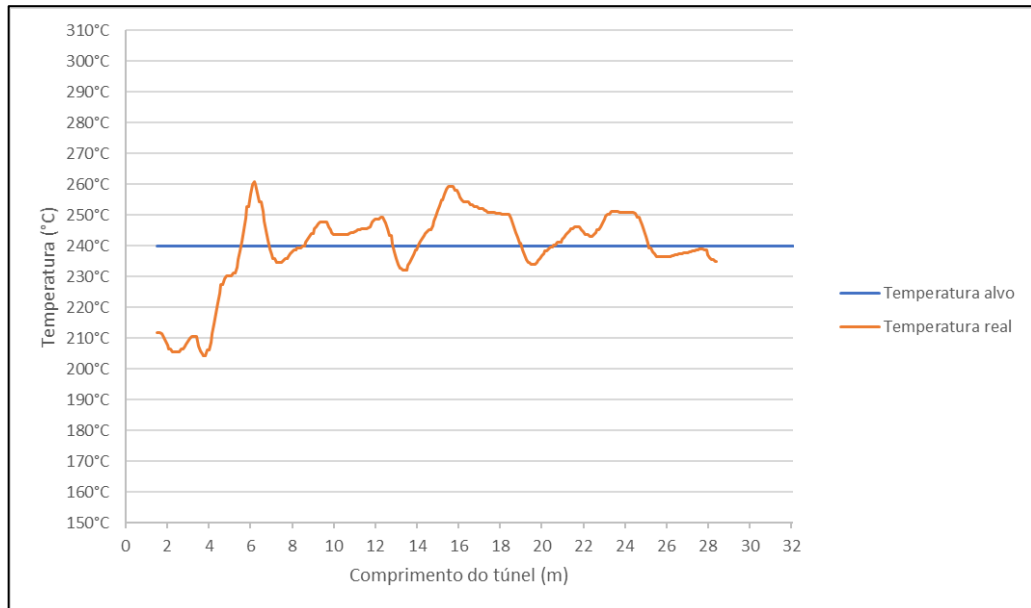
Vale ressaltar que a temperatura alvo foi alterada durante os ajustes e que não foi possível alcançar o alvo no início do túnel. Esse problema de temperatura no início do túnel resultou em outra melhoria: a troca do tipo das resistências. Também pode-se levantar o problema do comportamento do gráfico, que para conseguir uma melhor homogeneização necessita o uso do soprador de ar quente.

Esse processo de homogeneização foi replicado para outras cinco linhas de produção, ficando pendentes apenas duas até a finalização do trabalho. Com base nos gráficos, foi possível concluir que uma melhor homogeneização gera um ganho na estabilidade do processo, tendo em mente que as temperaturas alvo são definidas para melhor atender as propriedades dos compostos.

4.2 SOPRADOR DE AR QUENTE

Pelo comportamento senoidal do túnel, percebeu-se que o calor permanecia estático no local onde era gerado, ou seja, no local de montagem das resistências elétricas. Para forçar a movimentação do calor, foi utilizado um soprador de ar quente na entrada do túnel. Esse teste foi realizado na linha de produção de código 430, que produz perfis com composto maciço. A implementação da melhoria iniciou após a homogeneização dessa linha e a identificação do seu comportamento, do início da homogeneização até a obtenção do resultado final foram realizadas 26 medições. Na Figura 32, pode ser visto o gráfico já homogeneizado, porém sem a utilização do soprador.

Figura 32 - Curva de temperaturas da linha 430 antes do uso do soprador de ar quente

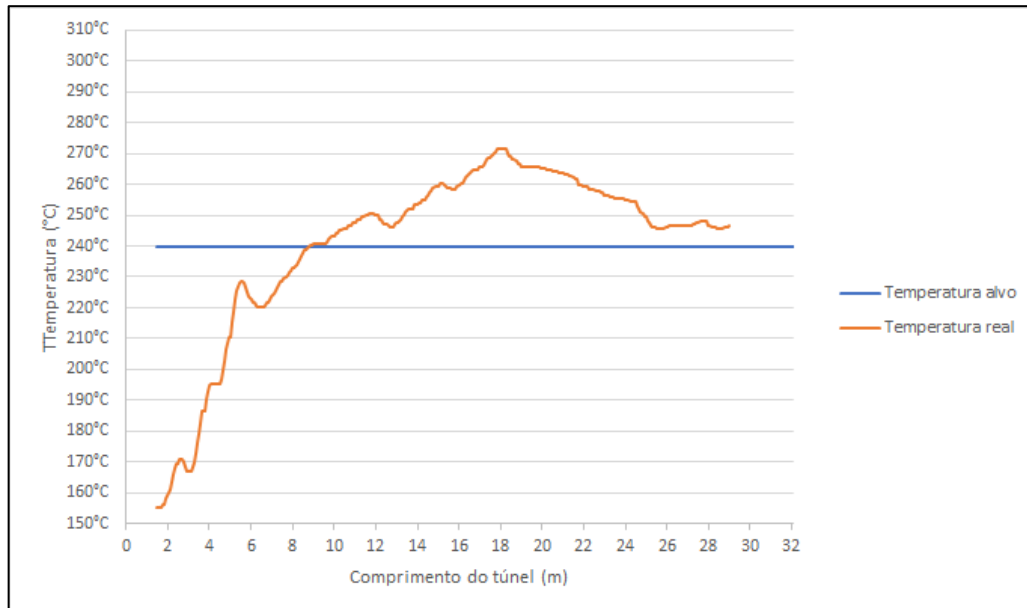


Fonte: O autor (2021)

Logo na primeira medição de temperaturas com o uso do soprador, é possível verificar a mudança de comportamento da curva. Porém, devido a movimentação, a perda de calor no início do túnel é perceptível no gráfico, como visto na figura 33.

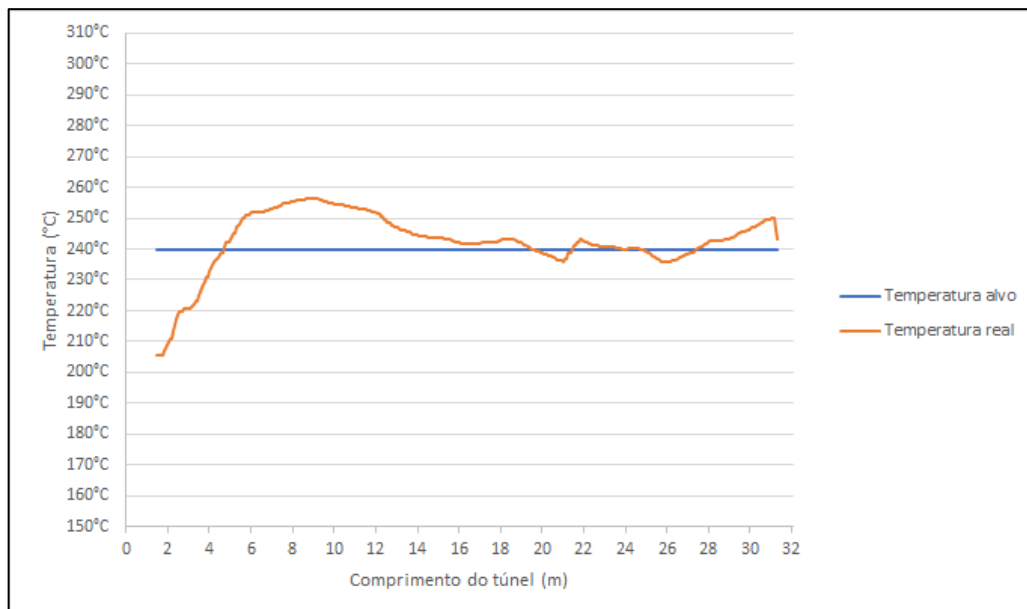
Devido à perda, as temperaturas tiveram que ser ajustadas novamente em busca da homogeneização. Após os devidos ajustes, foi possível aproximar as temperaturas reais do alvo novamente, mantendo o comportamento gerado pelo soprador. O início do túnel manteve o desempenho insuficiente, nunca atingindo a temperatura alvo. A nova homogeneização, utilizando o soprador de ar quente, pode ser visualizada na Figura 34.

Figura 33 - Curva de temperaturas da linha 430 sem ajustes após o uso do soprador de ar quente



Fonte: O autor (2021)

Figura 34 - Curva de temperaturas da linha 430 com uso do soprador de ar quente e ajustada



Fonte: O autor (2021)

Analisando as diferenças gráficas é visível a diferença de comportamento, saindo de uma forma senoidal com grandes diferenças entre picos e vales, para uma forma mais constante ao redor da temperatura alvo. É possível observar que, apesar

dos ajustes realizados nas temperaturas, não se alcançou a temperatura no início da curva. Isso se deve à diferença de temperatura que os perfis e a esteira entram no túnel. As resistências utilizadas não eram capazes de compensar o calor perdido para gerar o equilíbrio térmico do túnel, perfil e esteira.

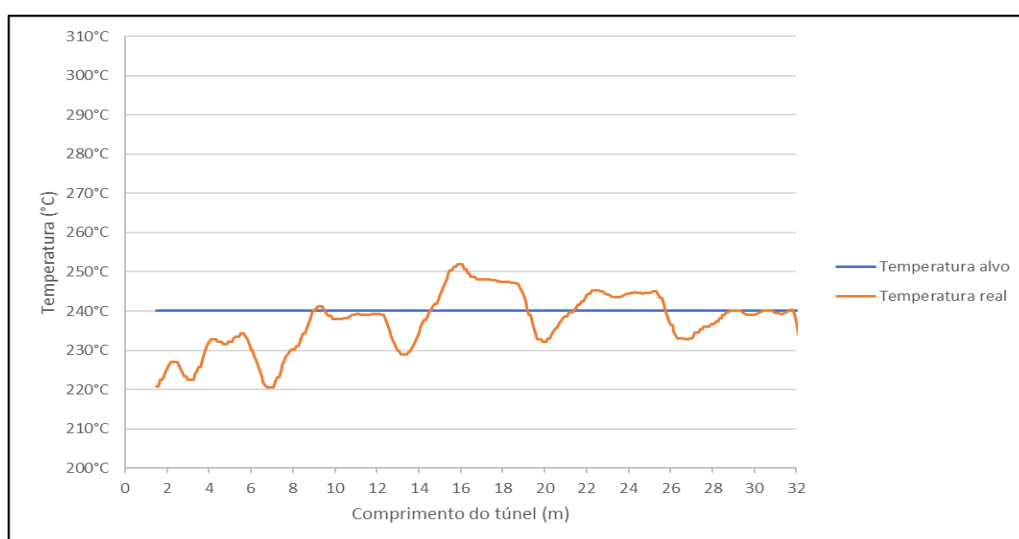
4.3 ALTERAÇÃO DO TIPO DE RESISTÊNCIA

Após a homogeneização de todos os túneis, ficou nítida a deficiência de temperatura que havia no início deles. A partir disso, iniciou-se as ações para a substituição do modelo das resistências por modelos mais eficientes.

As trocas das resistências foram realizadas apenas no primeiro módulo do túnel e até a data de finalização do trabalho, foi realizada a substituição apenas em duas linhas: 414 e 185.

Na sequência é mostrada a evolução do túnel de vulcanização da linha 414, partindo da sua temperatura homogeneizada antes da troca das resistências, passando pela sua temperatura após a troca e sem ajustes e finalizando com a curva final, após ajustes. No total foram realizadas 20 alterações, partindo da homogeneização até o último ajuste realizado. Na Figura 35, é possível visualizar a curva de temperaturas antes da troca de resistências.

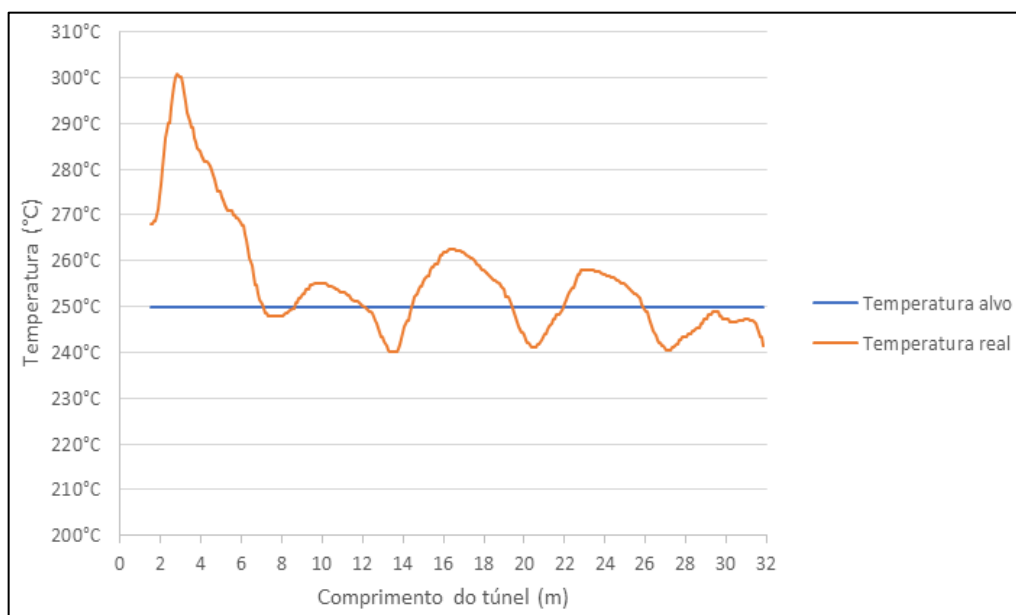
Figura 35 - Curva de temperatura da linha 414 antes da troca de resistências



Fonte: O autor (2021)

Com a instalação das resistências planas, houve um aumento considerável de temperatura no primeiro módulo do túnel que alterou o comportamento do gráfico como observado na Figura 36.

Figura 36 - Curva de temperatura da linha 414 após a troca de resistências

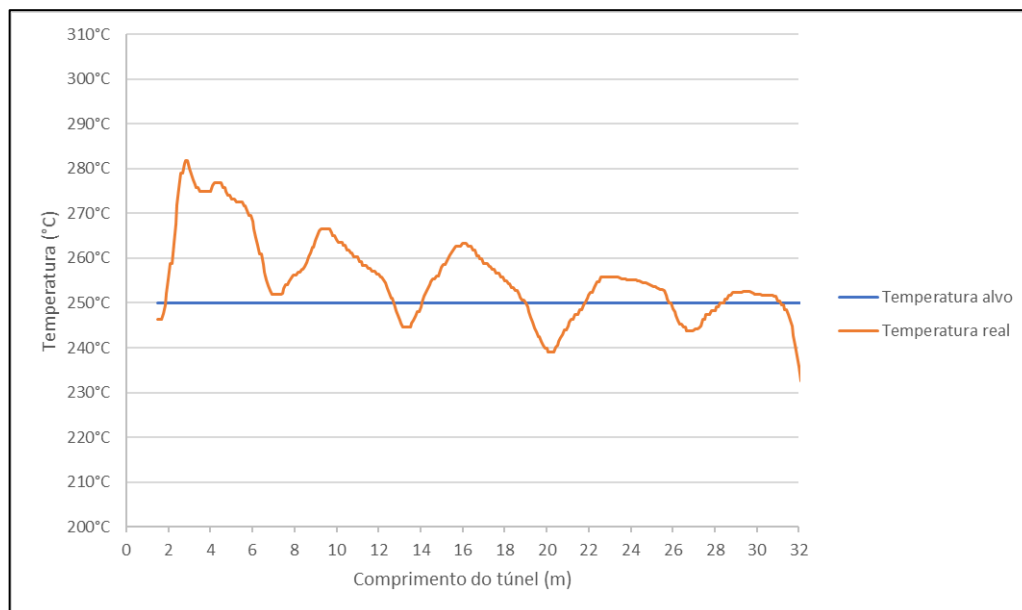


Fonte: O Autor (2021)

Ao ser realizada uma nova homogeneização, foi possível reduzir a temperatura do primeiro módulo aos poucos e ajustando o restante do túnel novamente para a temperatura alvo.

O comportamento senoidal manteve-se e não foi possível eliminá-lo sem a utilização de um soprador de ar quente ou outro meio que causasse movimentação do ar ao longo de todo o túnel. Observa-se a curva final do túnel da linha 414 na Figura 37.

Figura 37 - Curva de temperatura da linha 414 após a troca de resistências e ajustada



Fonte: O Autor (2021)

Fazendo uma comparação entre os gráficos, é possível concluir que a resistência plana é consideravelmente mais eficiente em relação à resistência elétrica tubular – ambas resistências com a mesma potência de 2500 W. Porém, a resistência plana de 2500 W mostrou-se com um superdimensionamento, já que não foi possível diminuir a amplitude dos picos e vales sem que o restante da curva diminuísse junto. Por isso, as resistências que serão instaladas no próximo túnel serão de 2000 W, para obter menor amplitude entre picos e vales e propiciar uma curva mais uniforme.

4.4 TÚNEL DE PRÉ-CHOQUE

O túnel de pré-choque foi utilizado em uma linha de elastômero, de código 167. Utilizou-se a fim de diminuir a diferença de temperatura entre o perfil e o túnel. Por ser um perfil de dois compostos, houve uma diferença de ganhos.

Foram poucos dias de teste, devido a um problema que não foi resolvido até o final deste trabalho, porém foi possível coletar dados suficientes para uma análise. A Tabela 3 mostra os dados que foram coletados.

Tabela 3 - Dados coletados durante o uso do túnel de pré-choque

Perfil	Temperatura de entrada		Temperatura de saída		Temperatura atribuída	Diferença	
	Composto esponjoso	Composto maciço	Composto esponjoso	Composto maciço		Composto esponjoso	Composto maciço
16134	60	105	90	110	200	30	5
6994	75	105	105	115	300	30	10
16167	70	110	110	115	300	40	5
16167	65	110	95	110	300	30	0
6915	65	95	110	105	300	45	10
16006	1	97	111	107	300	110	10
16006	68	98	119	109	330	51	11
16006	68	98	119	107	330	51	9
6315	67	97	92	105	330	25	8
16364	64	105	107	129	330	43	24
6047	65	100	102	111	330	37	11
6120	62	102	98	116	330	36	14
16019	63	111	99	122	330	36	11
16019	64	109	99	120	330	35	11
6432	64	99	98	111	330	34	12
6432	64	98	90	109	330	26	11
6588	67	101	94	117	330	27	16
6152	64	91	110	104	330	46	13
16362	67	99	101	129	350	34	30
6552	65	93	135	107	350	70	14
6216	57	88	97	110	350	40	22
6216	65	94	101	109	350	36	15
6216	61	90	99	109	350	38	19
6762	64	87	98	104	350	34	17
6762	62	88	99	105	350	37	17

Fonte: O Autor (2021)

Com o auxílio da tabela 3, é possível observar que o composto esponjoso ganha mais calor que o composto maciço, estando expostos às mesmas condições. Outra observação pertinente é que os perfis maiores obtiveram menores ganhos de temperatura.

Estes ganhos de temperatura geram uma diminuição da diferença entre perfil e túnel, com isso é possível imaginar que, somado à outras melhorias no túnel, o ganho seja significativo, já que o perfil entraria mais próximo da sua temperatura de vulcanização e necessitaria de menos tempo no interior do túnel.

4.5 TÚNEL DE PRÉ-AQUECIMENTO DA ESTEIRA

Com a chegada ao limite de temperatura do túnel de pré-aquecimento, foi definido como ganho a diferença de temperatura de entrada da esteira no túnel de

pré-aquecimento e a temperatura de saída do mesmo. Esse ganho de temperatura era por volta de 60 °C, sendo que a esteira entrava com temperatura próxima dos 60 °C e saía com aproximadamente 120 °C, gerando um ganho de 100% na temperatura.

Esse aumento na temperatura auxilia na diminuição de calor dissipado do túnel de vulcanização para a esteira, já que eles necessitarão de menos calor para entrar em equilíbrio. O limite de ganho de calor da esteira não foi atingido, já que o limite do túnel de pré-aquecimento foi alcançado primeiro e para aumentar esse ganho, deverá ser aumentada a potência das resistências elétricas do túnel de pré-aquecimento.

5 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho possibilitou fazer um aprofundamento teórico sobre o processo pelo qual a borracha passa para atingir sua forma final e ser destinada à venda. De tal forma, o estudo acerca da vulcanização e da extrusão dos perfis de borracha foi de suma importância para dar segmento ao projeto. A partir do ganho técnico com a leitura de artigos, foi possível dimensionar de maneira mais eficiente as melhorias a serem realizadas, baseando-se na literatura existente.

A análise dos resultados comprova a efetividade do projeto de melhorias iniciado a partir deste trabalho de conclusão de curso com dados gerados, onde demonstram a fluidez nos três grupos primários: melhorias estruturais, de parâmetro e de processo.

As melhorias estruturais foram as mais significativas. Por se tratarem de linhas de produção antigas, esse tipo de melhoria se fez necessária. A substituição das resistências gerou um grande ganho na estabilidade das temperaturas. Com mais tempo para trabalhar a partir das mudanças estruturais já concebidas, haverá possibilidade de novas alterações, gerando ganhos de produtividade ainda mais significativos.

A partir das melhorias de parâmetro foram estabilizadas as faixas de trabalho para os diferentes tipos de composto. Esse equilíbrio nas temperaturas causado pela homogeneização acarretou numa maior estabilidade no processo, evitando problemas causados por uma possível desordem nas temperaturas do túnel.

E, por fim, as melhorias de processo que foram usadas individualmente nas linhas, parecem mostrar resultados menos significativos, mas que ao serem utilizados em uma mesma linha de produção, poderão melhorar a qualidade do processo, resultando em maiores índices de produtividade.

Tal qual sugeria o objetivo principal e os específicos, foi possível alcançá-los. Houve ganhos de melhor qualidade do produto final, na produtividade e na redução de custos. O ganho na qualidade do produto irá refletir de forma a prospectar novos clientes e até mesmo valorizar o montante cobrado. Com o aumento na produtividade será possível assumir mais pedidos e, com a redução dos custos com a fabricação do produto, acumular capital e investir em novos equipamentos, mão de obra e infraestrutura.

Algumas das tarefas que foram designadas não puderam ser cumpridas. Isso se deu pelo desencontro deste projeto com os demais projetos da empresa Autotravi, além de problemas técnicos e de logística, resultando em planejamento de melhorias arquivados por tempo indeterminado. Ainda, algumas das melhorias deixaram de ser prioridade, dando espaço a outros projetos.

Para trabalhos futuros, sugerem-se pesquisas para melhorias acerca de temas como: o isolamento térmico de todo túnel de vulcanização e instalação de resistências do tipo plana em todo túnel, com maior eficiência, utilizando um número menor de resistências que tenham uma potência equivalente. Uso de termopares com leitura mais rápida e precisa, isso resultaria em coletas de dados mais assertivas. Uma melhora no sistema IHM, que atualmente leva um total de dezessete segundos para realizar uma leitura, quando deveria funcionar de forma mais rápida e precisa. E, por fim, uma melhora significativa na construção física dos túneis, em busca de um padrão.

6 REFERENCIAL TEÓRICO

ABTB. **Associação Brasileira de Tecnologia da Borracha**. Disponível em: <<https://www.abtb.com.br/arquivo/257>>. Acesso em 10 mai. 2021.

International Institute of Synthetic Rubber Producers. **Borracha sintética: A história de uma indústria**. Holanda, 1973.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciências dos polímeros**. Artliber: São Paulo, 2002.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.

CANTO, E. L. **Plástico bem supérfluo ou mal necessário?** Moderna. São Paulo, 2004.

CHUNG, C. I. **Extrusion of Polymers: Theory and Practice**. Munich: Hanser Publishers, 2000.

MONSANTO C. **Compounders Pocketbook: Chemicals for The Rubber Industry (1977)**.

CTB. **Ciência e tecnologia da borracha**. Disponível em: <<http://www.ctb.com>>. Acesso em 02 mai. 2021.

EBEWELE, R. O. **Polymer science and technology**. 1ª. ed. New. York: CRC Press LLC, 2000.

GARBIM, V. J. **Borrachas tecnologia, características, compostos e aplicações**. Publit. Rio de Janeiro, 2011.

GOMES, M. M. **Portal da indústria da borracha**, (2012) disponível em: <<http://www.rubberpedia.com>>. Acesso em 09 mai. 2021.

GOULART, E. A. **Reciclagem Energética de pneus automotivos através de reator de leito fluidizado: uma proposta para a questão ambiental**. Dissertação de mestrado da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1999.

GRISON, E. C. **Borrachas e seus aditivos**. Letra e Vida: Rio Grande do Sul, 2010.

HAGE Jr, E. **Aspectos Históricos sobre o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia de Polímeros**. Revista Polímeros, Volume 8. 1998.

HARPER, C. A. **Handbook of Plastics, Elastomers, and Composite**. 4th Edition. McGraw Hill Professional: New York, 2002.

HOFMANN, W. **Rubber Technology Handbook**, Hanser, New York, 1989.

INTERNATIONAL INSTITUTE OF SYNTHETIC RUBBER PRODUCERS (IISRP). **Worldwide Rubber Statistics**. Houston, 1996.

INTERNATIONAL RUBBER STUDY GROUP (IRSG). Disponível em: <<http://www.rubberstudy.org/welcome>>. Acesso em 02 mai. 2021.

LARROUSE. **Grande Enciclopédia Delta**. Rio de Janeiro, 1972.

LE COUTEUR, P., BURRESON, J. **Os botões de Napoleão**: as 17 moléculas que mudaram a história. Jorge Zahar Editora. Rio de Janeiro, 2006.

MANO, E. B. **Introdução aos polímeros**. Edgar Blucher. São Paulo, 2001.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos**. Artliber; APC (American Plastic Council), 1999.

MONTENEGRO, R. S. P., PAN, S. S. K. **Panorama do setor de borrachas**. BNDES Setorial. Rio de Janeiro, 1997.

OMONT, H. **A HEVEICULTURA NO BRASIL**. IRCA-IBAMA. Brasília, 1990.

PAPAUTSKY, D. **Borracha Recuperação e Regeneração**. Revista Borracha Atual 45, 2013.

PASSADOR, F. R., PESSAN, L. A., JUNIOR, A. R. **Blendas PVC/NBR por processamento reativo Blendas PVC/NBR**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 17, 2007

PIEROZAN, N., KOSERSKI, J. **Vulcanização de artefatos expressos**. Senai/RS, São Leopoldo. 2010.

RAUWENDAAL, C. **Polymer Extrusion**. Munich: Hanser Publishers, 2014.

ROCHA, E. C., LOVISON, V. M. H., PIEROZAN, N. J. **Tecnologia de transformação dos elastômeros**. 2.ed. rev. e ampl. São Leopoldo, RS: SENAI, 2007.

Rubberpedia. **Portal da indústria da borracha**. Disponível em: <<http://www.rubberpedia.com>>. Acesso em 02 mai. 2021.

SILVA, M. V. O. **Caracterização da mistura polimérica de borracha nitrílica (NBR) e poli cloreto de vinila (PVC) por calorimetria exploratória diferencial (DSC) e microscopia.** Monografia do Curso de Especialização em Polímeros. Instituto de Química. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000.

SHACKELFORD, J. E. **Ciência dos materiais.** Prentice Hall. São Paulo, 2008.

SHREVE, R. N., BRINK, J. A. **Chemical Process Industries.** 4Th Ed., Mcgraw-Hill. New York, 1977.