



Determinação das condições ideais de enformação dos diafragmas de borracha na vulcanização de pneus

CHAYANNE POSSAMAI DELLA RECH

Junho de 2020

DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES IDEAIS DE ENFORMAÇÃO DOS DIAFRAGMAS DE BORRACHA NA VULCANIZAÇÃO DE PNEUS

Chayanne Possamai Della Rech
1191125

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica

POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES IDEAIS DE ENFORMAÇÃO DOS DIAFRAGMAS DE BORRACHA NA VULCANIZAÇÃO DE PNEUS

Chayanne Possamai Della Rech
1191125

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Leonardo José da Silva Ribeiro e sob a coorientação do Professor Rafael Gustavo Schreiber.

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

<Grau Académico e Nome>

<Categoria, Instituição>

Orientador

Engenheiro Leonardo José da Silva Ribeiro

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Coorientador

Engenheiro Rafael Gustavo Schreiber

Professor Adjunto, Instituto Federal de Santa Catarina

Orientador de estágio

Engenheiro Nuno Miguel Couto Ferreira da Costa

Gestor de projecto da Eng. V, Continental Mabor

Arguente

<Grau Académico e Nome>

<Categoria, Instituição>

AGRADECIMENTOS

Quisera eu poder citar cada nome que de uma forma ou de outra, seja direta ou indiretamente, auxiliou-me no desenrolar deste trabalho. Não obstante, sob a pena de gerar uma lista demasiadamente extensa, contento-me em trazer lembrança aos que estiveram mais presentes, muito embora mantenha cada nome carinhosamente guardado à memória.

Minha maior e mais profunda gratidão a minha família que, muito teimosamente, se recusou a acreditar que eu não conseguiria, exprimindo sempre palavras de vívido incentivo e de compreensão. Também a todos que dividiram esta experiência comigo, que fizeram de Porto o meu lar e o meu coração. A Vinícius, um anjo na Terra, que arrancou risadas e tornou o mundo mais claro e bonito, mesmo com céus nublados e tempos chuvosos; juntamente ao Victor, Yago, Matheus e Içá, que tantas vezes reconfortaram e forneceram segurança e carinho, representando uma verdadeira família, em um momento em que meu próprio lar me fazia tanta falta. A David que, acima de qualquer intempérie, de modo inenarrável representou meu alicerce, meu companheiro, meu melhor amigo e meu irmão, minha força e meu ânimo, a quem devo infinitos agradecimentos. A minha irmã, meu maior orgulho e motivação, e a Leo, cujo carinho sempre fez meus dias tão doces.

Pela oportunidade maravilhosa, agradeço imenso ao meu coordenador, Prof. Matheus Fontanelle que, em parceria com o Eng. Francisco Silva, concedeu-me a oportunidade desta experiência única. De igual modo, devo a empresa Continental Mabor e ao meu orientador de estágio, Eng. Nuno Costa, o desafio e a oportunidade de crescer enquanto pesquisadora, representando uma excelente primeira experiência no mercado de trabalho.

Final e principalmente, afirmo com relevante segurança que o ponto essencial na sequência desta pesquisa se baseou em todo o apoio e orientação recebidos de ambos meus orientadores, Prof. Leonardo Ribeiro e Prof. Rafael Schreiber. Ambos, muito além de toda a paciência, solicitude e conhecimento desprendidos, incentivaram e encorajaram-me de modo tão dedicado e atencioso, fornecendo-me força e coragem.

PALAVRAS-CHAVE

Vulcanização, falha, diafragma, parâmetros.

RESUMO

O estudo apresentado por meio deste trabalho fundamenta-se na análise e resolução de problemas reais apresentados durante o processo de vulcanização, uma importante etapa na fabricação de pneus, responsável por atribuir à borracha as propriedades necessárias para a aplicação desejada. O problema em questão está relacionado à ocorrência de furos na superfície do diafragma, sendo este o componente inflável encarregado por conferir formato ao pneu através da sua prensagem contra o molde. A metodologia utilizada se estruturou, primordialmente, no estudo integral do processo, delimitando e caracterizando cada etapa de funcionamento e associando seus parâmetros específicos a possíveis desgastes do material. Através da demarcação de variáveis, internas ou externas ao maquinário, que poderiam interferir na durabilidade dos diafragmas, o estudo centralizado de cada um dos parâmetros baseou-se no seu isolamento e na observação da resposta do material à sua variação, tencionando a determinação das sensibilidades do sistema. O método aplicado a cada variável foi considerado o ideal para seu estudo, envolvendo a análise do histórico de falhas da empresa, o planejamento de testes práticos e a abordagem matemática e física do problema, embasando os efeitos observados e adiantando teoricamente a resposta do sistema a possíveis alterações. Os resultados obtidos por método matemático antecipam a economia de tempo de enchimento dos diafragmas, através da utilização de válvulas com maiores KVS ou com maiores percentagens de abertura, bem como garantem a maior sensibilidade deste tempo ao volume total do sistema a ser preenchido por vapor, perante a pouca influência gerada pelas perdas de carga dos canais de distribuição ou demais factores considerados. Através da análise das dimensões dos artigos, determinou-se desprezável a influência da variação da espessura do diafragma na percentagem de falhas sofridas, ao contrário do apresentado pela análise da posição do fluido, que representou uma considerável preponderância da falha nas extremidades do componente, em relação a posição central. As demais análises necessárias foram planejadas, justificadas e estruturadas de acordo com as possibilidades da empresa, de modo a cumprir o levantamento de dados futuros, garantindo a convergência nos resultados necessário para a otimização do sistema.

KEYWORDS

Vulcanization, failure, diaphragm, parameters.

ABSTRACT

The study presented through this work is based on the analysis and resolution of real problems presented during the vulcanization process, an important step in the manufacture of tires, responsible for attributing to rubber the necessary properties for the desired application. The problem in question is related to the occurrence of holes in the diaphragm surface, this being the inflatable component responsible for giving shape to the tire through its pressing against the mold. The methodology used was structured, primarily, in the integral study of the process, delimiting and characterizing each stage of operation and associating it specific parameters to possible wear of the material. Through the demarcation of variables, internal or external to the machinery, which could interfere in the durability of the diaphragms, the centralized study of each of the parameters was based on its isolation and on the observation of the material's response to its variation, intending to determine the sensitivities of the system. The method applied to each variable was considered ideal for its study, involving the analysis of the company's failure history, the planning of practical tests and the mathematical and physical approach to the problem, basing the observed effects and theoretically advancing the system's response to possible changes. The results obtained by mathematical method anticipate the saving of diaphragm filling time, through the use of valves with higher KVS or with higher opening percentages, as well as guaranteeing the greater sensitivity of this time to the total volume of the system to be filled by steam, in view of the little influence generated by the load losses of the distribution channels or other factors considered. Through the analysis of the dimensions of the articles, the influence of the variation of the diaphragm thickness in the percentage of failures suffered was negligible, in contrast to the one presented by the analysis of the fluid position, which represented a considerable preponderance of the failure at the ends of the component, in relation to the central position. The other necessary analyzes were planned, justified and structured according to the company's possibilities, in order to comply with the survey of future data, guaranteeing the convergence in the results necessary for the optimization of the system.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

CAV	Número de identificação da cavidade
OC	Orifício calibrado
OFF	Válvula fechada
ON	Válvula aberta
PHR	Por cem partes de borracha
VO	Válvula ON-OFF
VP	Válvula proporcional
VR	Válvula de retenção

Lista de Unidades

A	Dureza Shore
J	Joule
K	Kelvin
kg	Quilograma
m	Metro
°C	Grau Celsius
Pa	Pascal
s	Segundo
W	Watt
Ω	Ohm

Lista de Símbolos

D_n	Diâmetro da "Parte n " do diafragma, mm
FH	Comprimento do anel do diafragma, mm
FW	Espessura do anel do diafragma, mm
H	Altura do diafragma, mm
H_n	Altura da "Parte n " do diafragma, mm
ID_L	Diâmetro do anel inferior do diafragma, mm
ID_U	Diâmetro do anel superior do diafragma, mm
k_v	Coeficiente de escoamento, $m^3/s/(kPa)^{0,5}$
\dot{m}	Caudal mássica de vapor, kg/s
M	Massa molar do fluido, g/mol
M_f	Massa final de vapor no diafragma, kg
M_o	Massa inicial de vapor no diafragma, kg
$M(t)$	Massa de vapor no interior do diafragma, kg
M_v	Massa molar do vapor, g/mol

Lista de Símbolos (continuação)

OC	Espessura das paredes verticais do diafragma, mm
OD	Diâmetro externo do diafragma, mm
OH	Espessura das paredes horizontais do diafragma, mm
P	Pressão, Pa
P _{ext}	Pressão exercida pelo molde contra o diafragma, Pa
P _f	Pressão final a jusante da válvula proporcional, Pa
P _i	Pressão inicial a jusante da válvula proporcional, Pa
P _{int}	Pressão interna ao diafragma, Pa
P _{mon}	Pressão a montante da válvula proporcional, Pa
P(t)	Pressão a jusante da válvula proporcional, Pa
Q	Caudal movimentado pela válvula completamente aberta, m ³ /s
R	Constante universal dos gases, m ³ Pa/K/mol
R _v	Constante dos gases para o vapor, m ³ Pa/K/kg
t	Tempo, s
T	Temperatura do fluido, K
T _{ext}	Temperatura externa ao diafragma, °C
T _{int}	Temperatura interna ao diafragma, °C
V	Volume total interno ao diafragma, dm ³
V _d	Volume interno do diafragma, m ³
V _c	Volume dos componentes internos ao diafragma, m ³
ρ	Massa volúmica, kg/m ³

GLOSSÁRIO DE TERMOS

COM	Prensa cujas cavidades compartilham a mesma válvula proporcional
IND	Prensa cujas cavidades possuem válvulas proporcionais individuais
kv	Coefficiente de escoamento de uma válvula de controlo
KVS	Parâmetro que caracteriza o caudal movimentado pela válvula de controlo
Medida	Classificação do pneu, de acordo com seu modelo
Pneu verde	Pneu anterior ao processo de vulcanização
<i>Scrap</i>	Material descartado perante falha, sucata
Tempo morto	Tempo dedicado à manutenção e à preparação da prensa, sem que o pneu esteja de fato sendo vulcanizado
Tempo útil	Período no qual a vulcanização de facto ocorre

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: VISTA AÉREA DA EMPRESA CONTINENTAL MABOR (CONTINENTAL, 2020).	2
FIGURA 2: LIGAÇÃO ENTRE CADEIAS DE BORRACHA NATURAL PELA VULCANIZAÇÃO (AFINKO, 2018).	10
FIGURA 3: FORNECIMENTO DE CALOR (SETAS VERMELHAS) E PRESSÃO (SETAS AZUIS) SOBRE O PNEU (PINHEIRO, 2001).	12
FIGURA 4: EXEMPLO DE UMA PRENSA DE PNEUS COM DUAS CAVIDADES (CAETANO, 2010).	13
FIGURA 5: PNEU VERDE (CAETANO, 2010).	13
FIGURA 6: CAVIDADE DE UMA PRENSA A) EM VISTA FRONTAL (ESQUERDA) E B) EM CORTE (DIREITA).	14
FIGURA 7: GRÁFICO DA PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO AO LONGO DO PROCESSO DE VULCANIZAÇÃO.	14
FIGURA 8: GRÁFICO DA PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO AO LONGO DA ETAPA 1.	15
FIGURA 9: GRÁFICO DA PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO AO LONGO DA ETAPA 2.	16
FIGURA 10: GRÁFICO DA PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO AO LONGO DA ETAPA 3.	16
FIGURA 11: VULCANIZAÇÃO COMPLETA EM PRENSA, A) CARREGAMENTO DO PNEU VERDE, B) FECHAMENTO DA PRENSA, C) PRESSURIZAÇÃO, D) RETIRADA DO PRODUTO FINAL (PEREIRA, 2011).	17
FIGURA 12: MOLDE PARA UM PNEU (CONTINENTAL, 2015).	18
FIGURA 13: SEGMENTO DO MOLDE COM PISO (CONTINENTAL, 2015).	18
FIGURA 14: INSCRIÇÕES INFORMATIVAS GERADAS PELA PAREDE DO MOLDE (CONTINENTAL, 2015).	18
FIGURA 15: ANEL DO TALÃO (MOULAGE, 2016).	19
FIGURA 16: VISTA LATERAL DE UM MOLDE MONTADO (GOMES, 2018).	19
FIGURA 17: MOLDE (INDICADO POR #) NO INTERIOR DE UM CONTENTOR (INDICADO POR +) (TAUFORM, 2010).	19
FIGURA 18: TUBULAÇÃO DE UMA PRENSA DE VULCANIZAÇÃO, COM INDICAÇÃO DE TERMINAIS.	20
FIGURA 19: REPRESENTAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE FLUIDO NA TUBULAÇÃO.	21
FIGURA 20: INDICAÇÃO DAS VÁLVULAS DURANTE A ETAPA 1.	22
FIGURA 21: INDICAÇÃO DAS VÁLVULAS DURANTE A ETAPA 2.	23
FIGURA 22: INDICAÇÃO DAS VÁLVULAS DURANTE O VÁCUO DA ETAPA 3.	23
FIGURA 23: VÁLVULA DE CONTROLO (SAMSON, 2019).	24
FIGURA 24: COMPONENTES DE UMA VÁLVULA DE CONTROLO (SILVA, 2004).	24
FIGURA 25: EXEMPLO DE VÁLVULA FECHADA (FBV INC.).	26
FIGURA 26: EXEMPLO DE VÁLVULA ABERTA (FBV INC.).	26
FIGURA 27: VÁLVULA PROPORCIONAL COM POSICIONADOR (SAMSON, 2019).	27
FIGURA 28: INTERIOR DE UMA VÁLVULA PROPORCIONAL (SAMSON, 2012).	28
FIGURA 29: VÁLVULA A) DE PORTINHOLA E B) BORBOLETA (COWINNS, 2017).	29
FIGURA 30: INTERIOR DE UMA VÁLVULA DE PORTINHOLA SIMPLES (JEFFERSON, 2019).	29
FIGURA 31: DIAFRAGMA (CAETANO, 2010).	30
FIGURA 32: A) DELIMITAÇÃO DAS PARTES DO VOLUME INTERNO DO DIAFRAGMA E B) SUAS ALTURAS E DIÂMETROS.	37

FIGURA 33: CURVA DE KV PARA DIFERENTES ABERTURAS DA VÁLVULA PROPORCIONAL (SAMSON, 2018).	39
FIGURA 34: INDICAÇÃO DOS VALORES DE KV UTILIZADOS.	40
FIGURA 35: VOLUME INTERNO REAL DO DIAFRAGMA EM UTILIZAÇÃO, POR SOLIDWORKS.	41
FIGURA 36: MOVIMENTAÇÃO DA HASTE PARA AJUSTE DO DIAFRAGMA.	42
FIGURA 37: CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO NO DIAFRAGMA.	51
FIGURA 38: REPRESENTAÇÃO DAS PRESSÕES RELATADAS NA RECEITA DA ETAPA DE ENFORMAÇÃO.	52
FIGURA 39: DOBRAS EM UM DIAFRAGMA DESPRESSURIZADO (CAETANO, 2010).	54
FIGURA 40: DIMENSÕES DE UM DIAFRAGMA (CONTINENTAL, 2017).	58
FIGURA 41: RELAÇÃO ENTRE ESPESSURA DO DIAFRAGMA E OCORRÊNCIA DE REFUGOS.	59
FIGURA 42: RELAÇÃO ENTRE VOLUME INTERNO DO DIAFRAGMA E OCORRÊNCIA DE REFUGOS.	60
FIGURA 43: RECEITA DE PRESSÕES DE VULCANIZAÇÃO.	61
FIGURA 44: RELAÇÃO ENTRE A PRESSÃO DE PRÉ-ENFORMAÇÃO E A PERCENTAGEM DE REFUGOS.	62
FIGURA 45: PERCENTAGEM DE POSIÇÃO DE REFUGOS.	64
FIGURA 46: CARROS DE PNEUS (SILVA, 2016).	67
FIGURA 47: PERÍODO DE SIMULAÇÃO.	69
FIGURA 48: ETAPAS DE ANÁLISE.	70
FIGURA 50: PRESSÃO NO INTERIOR DO DIAFRAGMA EM A) T = 3,7S E B) T = 10S.	71
FIGURA 49: PRESSÃO NO INTERIOR DO DIAFRAGMA EM A) T = 0 E B) T = 2,5S.	71
FIGURA 51: TEMPERATURA NO INTERIOR DO DIAFRAGMA EM A) T = 0 E B) 0,05S.	72
FIGURA 52: TEMPERATURA NO INTERIOR DO DIAFRAGMA EM A) T = 12S E B) T = 30S.	73
FIGURA 53: VELOCIDADE DO FLUIDO NO INTERIOR DO DIAFRAGMA EM A) T = 0, B) T = 0,15S, C) T = 6S E D) 30S.	74
FIGURA 54: SIMULAÇÃO DE VELOCIDADE, POR SOLIDWORKS.	75
FIGURA 53: VISTA EM CORTE DO CABEÇOTE, POR SOLIDWORKS.	76
FIGURA 54: A) INDICAÇÃO DA ÁREA DO ANEL SUPERIOR EXPOSTO AO VAPOR, VIA SOLIDWORKS	76
FIGURA 55: COMPONENTES DE UM PNEU (UNIROYAL, 2020).	93
FIGURA 56: CLASSIFICAÇÃO DAS VÁLVULAS DE CONTROLO (SILVA, 2004).	94
FIGURA 57: SUPERFÍCIES 1 (ESQUERDA), 2 (CENTRO) E 5 (ESQUERDA) (CONTINENTAL, 2017).	95
FIGURA 58: DIMENSÕES DE UM DIAFRAGMA (CONTINENTAL, 2017).	95
FIGURA 61: MODELO DO PROGRAMA UTILIZADO NO SOFTWARE OCTAVE.	99
FIGURA 62: EVOLUÇÃO DA MASSA INTERNA DE VAPOR EM FUNÇÃO DO TEMPO, POR OCTAVE.	100
FIGURA 63: CÉLULAS DE RESOLUÇÃO, POR EXCEL.	101
FIGURA 64: EVOLUÇÃO DA MASSA INTERNA DE VAPOR EM FUNÇÃO DO TEMPO, POR EXCEL.	102
FIGURA 65: DISTRIBUIÇÃO DE PRENSAS NA FÁBRICA, POR ORDEM DE FILA.	102
FIGURA 66: DISTRIBUIÇÃO DE PRENSAS NA FÁBRICA, POR ORDEM DE CANAL.	103
FIGURA 67: TUBULAÇÃO DE UMA PENSA DE PNEUS, EM VISTA SUPERIOR.	104
FIGURA 68: TUBULAÇÃO DE UMA PENSA DE PNEUS, EM VISTA ISOMÉTRICA.	105
FIGURA 69: CONJUNTO DE TUBULAÇÃO E MOLDE, EM VISTA SUPERIOR.	105
FIGURA 70: CONJUNTO DE TUBULAÇÃO E MOLDE, EM VISTA ISOMÉTRICA.	106
FIGURA 71: CONJUNTO DO MOLDE, VISTA ISOMÉTRICA EM CORTE.	106
FIGURA 72: CONJUNTO DO MOLDE, VISTA FRONTAL EM CORTE.	107

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE TRABALHO.	4
TABELA 2: COMPORTAMENTO DAS PROPRIEDADES DA BORRACHA APÓS O PROCESSO DE VULCANIZAÇÃO.	10
TABELA 3: CONDIÇÃO DAS VÁLVULAS <i>ON-OFF</i> DURANTE A VULCANIZAÇÃO.	23
TABELA 4: OBJETIVOS E METODOLOGIAS.	35
TABELA 5: VOLUME INTERNO DOS DIAFRAGMAS UTILIZADOS.	38
TABELA 6: VALORES DE KV APRESENTADOS PARA DIFERENTES ABERTURAS DA VÁLVULA PROPORCIONAL.	40
TABELA 7: TEMPOS DE INFLAÇÃO PARA VÁLVULAS DE KVS 2,5.	45
TABELA 8: TEMPOS DE INFLAÇÃO PARA VÁLVULAS DE KVS 4.	46
TABELA 9: ATRASOS DE INFLAÇÃO QUANTO AO VOLUME TOTAL.	47
TABELA 10: ATRASOS DE INFLAÇÃO QUANTO A PERDA DE CARGA DO SISTEMA.	48
TABELA 11: INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PARÂMETROS NO TEMPO DE ENCHIMENTO TOTAL.	48
TABELA 12: POSSÍVEIS CAUSAS E SUAS CONDIÇÕES.	56
TABELA 13: EXEMPLO DE TABELA DE DADOS, MODELO 1.	57
TABELA 14: EXEMPLO DE TABELA DE DADOS, MODELO 2.	63
TABELA 15: OBJETIVOS CONCLUÍDOS.	81
TABELA 16: VARIÁVEIS E SUAS INFLUÊNCIAS.	83
TABELA 17: DIMENSÕES DOS DIAFRAGMAS (CONTINENTAL, 2017).	95
TABELA 18: PROPRIEDADES TÍPICAS DA BORRACHA BUTÍLICA (ADAPTADO DE CAETANO, 2010).	96
TABELA 19: PRESSÕES ATMOSFÉRICAS EM DIFERENTES ALTITUDES (ADAPTADA DE ASHRAE, 2009).	97
TABELA 20: RECEITA DE PRESSÃO DOS DIAFRAGMAS PARA A ETAPA DE PRÉ-ENFORMAÇÃO.	103
TABELA 21: PROPRIEDADES DO MATERIAL DA HASTE (OVAKO, 2017).	107

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Continental AG	1
1.1.1	Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A	1
1.1.2	Produto e produção	2
1.1.3	Contextualização do problema.....	3
1.2	Objetivos e estrutura do relatório	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Processo de vulcanização.....	9
2.2	Prensa de vulcanização de pneus	12
2.2.1	Ciclo de funcionamento	12
2.2.1.1	Etapa 1 – Inserção do pneu e enchimento do diafragma	15
2.2.1.2	Etapa 2 – Fornecimento de vapor a alta pressão e vulcanização do pneu	15
2.2.1.3	Etapa 3 – Despressurização e retirada do produto final.....	16
2.2.2	Molde e contentor	17
2.2.3	Tubulações	20
2.2.4	Válvulas	21
2.2.5	Válvulas de controlo	24
2.2.5.1	Válvula proporcional	27
2.2.5.2	Válvulas de retenção.....	28
2.3	Diafragma	30
3	DESENVOLVIMENTO	34
3.1	Características de inflação das válvulas proporcionais	36
3.1.1	Diafragmas utilizados	36
3.1.1.1	Determinação do volume interno.....	36
3.1.2	Kv e KVS	38
3.1.3	Pressões de trabalho	40
3.1.4	Volume a ser preenchido	41
3.1.5	Formulação matemática.....	43

3.1.6	Resolução	44
3.1.6.1	KVS 2,5	45
3.1.6.2	KVS 4	46
3.2	Atraso de inflação	46
3.2.1	Volume total	47
3.2.2	Perda de carga dos canais de distribuição	48
3.2.3	Relevância de parâmetros	48
3.3	Propriedades do diafragma	49
3.4	Ajuste de parâmetros	49
3.4.1	Refugos	49
3.4.1.1	Possíveis causas	50
3.4.2	Recolhimento de dados	57
3.4.2.1	Modelo 1	57
3.4.2.2	Modelo 2	63
3.4.3	Testes	64
3.4.3.1	Metodologia	65
3.4.3.1.1	Teste 1 – Receita de pressões	65
3.4.3.1.2	Teste 2 – Lubrificação	66
3.4.3.1.3	Teste 3 – Características do diafragma nos primeiros ciclos	67
3.4.4	Resultados	68
3.5	Simulação do escoamento	68
3.5.1	Resultados	70
3.5.1.1	Pressão	70
3.5.1.2	Temperatura	72
3.5.1.3	Velocidade	73
3.6	Pressão máxima de enformação	75
3.6.1	Deformação da haste do diafragma	75
3.6.2	Cedência do cilíndrico hidráulico	77
4	CONCLUSÕES	81
4.1	Conclusões	81
4.2	Proposta de trabalhos futuros	84
5	BIBLIOGRAFIA	89
6	ANEXOS	93
6.1	Anexo 1 – Componentes básicos de um pneu	93

6.2	Anexo 2 – Classificação das válvulas de controlo	94
6.3	Anexo 3 – Características dimensionais dos diafragmas	95
6.4	Anexo 4 – Propriedades dos diafragmas.....	96
6.5	Anexo 5 – Determinação da pressão atmosférica local.....	97
6.6	Anexo 6 – Resolução numérica da equação de inflação da válvula proporcional	97
6.7	Anexo 7 – Distribuição de prensas na fábrica	102
6.8	Anexo 8 – Receitas de pressão para as etapas iniciais da vulcanização	103
6.9	Anexo 9 – Desenho mecânico dos sistemas	104
6.10	Anexo 10 – Propriedades do material da haste do diafragma.....	107

INTRODUÇÃO

- 1.1 Continental AG
- 1.2 Objetivos e estrutura do relatório

1 INTRODUÇÃO

Perante a constante modernização do ambiente industrial, cuja competitividade e globalização ditam a procura incansável pela melhoria de métodos e processos, torna-se imperativa não somente a busca por novas tecnologias, mas também a análise dos processos já comumente utilizados e a busca por sua otimização. O melhor aproveitamento do tempo, a menor necessidade de mão-de-obra e o fortalecimento da produção representam a motivação fundamental para a busca pela excelência, objetivando a amplificação dos ganhos e redução dos desperdícios.

A otimização de sistemas já existentes, amplamente utilizados e difundidos, consiste em um desafio de análise e estudo de parâmetros que fazem frente ao comodismo, visando o primor dos processos. É com isso em vista, em compromisso com o avanço de suas tecnologias, que a empresa Continental, insigne na indústria de pneus, investiu no estudo e aprimoramento de seus métodos de fabricação, resultando no trabalho apresentado a seguir.

1.1 Continental AG

A empresa Continental, fundada em 1871 na cidade alemã de Hanôver, especializou-se originalmente na produção de pequenos componentes de borracha, tecidos emborrachados, e pneus maciços para carruagens e bicicletas (Continental, 2020). Acompanhando de perto os avanços tecnológicos de sua época, a empresa logo sobressaiu também na produção de pneus para automóveis, sendo a primeira companhia a desenvolver um padrão de desenho de piso e tecnologias antiderrapantes, que viriam a se tornar precursoras dos atuais pneus de inverno, próprios para a neve. Além da fabricação de pneus, a empresa também fez-se largamente presente em diversas áreas da engenharia, desdobrando-se em variados ramos e ampliando seus conhecimentos, modernizando-se constantemente de acordo com as necessidades de seus clientes. Sob esta perspectiva, após mais de quarenta anos de fundação, a empresa coleciona diversas inovações e avanços, contando com filiais espalhadas por todo o mundo. Uma de suas representantes em Portugal, a Continental Mabor, é a empresa na qual se desenvolveu este trabalho.

1.1.1 Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A

Localizada em Vila Nova de Famalicão, ao norte de Portugal, a empresa Continental Mabor (Figura 1) é especializada na produção de pneus, tanto para *OEM* (*Original Equipment Manufacturer*) como para MS (Mercado Substituição) (Gonçalves, 2012). Fundada no final da década de 1980 e oficialmente coadunada com a então empresa de pneus da região, a empresa Mabor, em 1993, a nova filial passou a

representar grande parte do desenvolvimento regional, através da geração de empregos e da exportação de seus produtos, tornando-se, actualmente, uma das maiores exportadoras do país.

Visando a sua optimização e em parceria com o Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), a Continental Mabor buscou investir na análise de seus processos, propiciando a pesquisa desenvolvida nos capítulos subsequentes.



Figura 1: Vista aérea da empresa Continental Mabor (Continental, 2020).

1.1.2 Produto e produção

Muito embora a empresa se especialize constantemente no desenvolvimento e na produção de diversos componentes, a fábrica em questão, situada em Lousado, tem seu portfólio constituído essencialmente por pneus para uma ampla gama de veículos, como automóveis desportivos, de alta velocidade, de tracção total, e entre outros. Os elementos estruturais de tais pneus podem variar consoante as especificações técnicas pretendidas (Gomes, 2018), não obstante, existem componentes que são essenciais à sua estrutura, sendo eles demonstrados no Anexo 1.

A empresa, além da produção de pneus para a marca Continental AG, provê também produtos para as demais marcas do grupo, tais quais *General Tires*, *Semperit*, *Gislaved*, *Mabor*, entre outras (Gomes, 2018). Estes pneus são produzidos de modo integral dentro da própria empresa, cujo processo de produção é composto basilamente por cinco etapas, descritas a seguir:

1. **Misturação:** etapa na qual todos os materiais necessários para a fabricação do pneu são “misturados”, dando origem a um tipo especial de borracha - uma

- mistura de borracha natural, borracha sintética e o chamado "negro de fumo", que é um derivado do petróleo usado para deixar a mistura mais resistente (Big Tires, 2020). São acrescentados também pigmentos, sílica, óleos e entre outros (provenientes do "Armazém de matérias-primas");
2. **Preparação:** A borracha fabricada é então cortada em faixas que irão estruturar o pneu. Nesta etapa também são preparados todos os outros componentes, como talões, pisos e paredes, recorrendo ao maquinário mecânico da fábrica para extrusões, calandragens e cortes (Carvalho, 2012). Alguns destes componentes também serão revestidos com borracha;
 3. **Construção:** Montagem, de dentro para fora, de todos os componentes fabricados nas duas etapas anteriores, unindo-se as cintas têxteis e metálicas, os talões e as lonas (gerando a carcaça do pneu) e posteriormente unindo a carcaça ao piso (por meio de maquinário específico);
 4. **Vulcanização:** Passagem do pneu pelo processo de vulcanização, onde será submetido a elevadas pressões e temperaturas, adquirindo propriedades específicas e sendo moldado para seu formato final;
 5. **Inspeção final:** O artigo, em sua forma final, passa por inspeções que garantem o cumprimento de todos os seus requisitos de qualidade. Após a aprovação, é armazenado e posteriormente comercializado.

A fábrica da Continental Mabor, responsável por todos os processos descritos, é organizada de modo a suprir e garantir o funcionamento de todos os estágios de produção simultaneamente. Para tal, sua administração se divide em diferentes departamentos, cada qual sendo encarregado e denominado de acordo com uma etapa específica. O presente projecto se desenvolveu no departamento IV (etapa de vulcanização), com o auxílio de seus engenheiros e responsáveis. Neste estudo, englobaram-se o entendimento do processo químico de vulcanização, seus parâmetros, maquinários e funcionamentos gerais.

1.1.3 Contextualização do problema

No âmbito da vulcanização e suas características, o objeto de análise para este estudo concentrou-se no maquinário utilizado e seus respetivos componentes. Sendo um processo fabril efetivo, esta etapa deriva de um conjunto de fatores e especificações que buscam garantir o seu funcionamento ideal, de modo que, por mais bem consolidado que o sistema se apresente, estará sempre propenso a variações de desempenho que poderão gerar imperfeições que, por sua vez, acarretam em falhas e desperdícios. Estas falhas ocorrem, seja por influência externa ou interna, como uma consequência não apenas de defeitos acidentais, mas também de parâmetros de funcionamento cuja regulação não seja, de facto, a ideal para as condições existentes.

Assim como o artigo fabricado, os equipamentos e componentes utilizados também estão sujeitos a um conjunto de limitações físicas e químicas que integram o

balanço de parâmetros de funcionamento, devendo ser estudadas, analisadas e otimizadas. Mais especificamente, o principal interesse deste trabalho é determinar as melhores condições de funcionamento do maquinário responsável pela vulcanização do pneu, de modo a reduzir os defeitos apresentados e facilitar o processo, com particular atenção ao diafragma, um componente de borracha semelhante a um “balão” responsável pela prensagem do pneu contra o molde.

O diafragma, tal qual estudado no decorrer deste trabalho, está sujeito a uma série de esforços que vão desde a sua inflação e pressurização até o sustento do pneu durante todo o processo. Estas condições, impostas ao material, acabam por culminar no desgaste prematuro e posterior falha do componente, ocasionando o desperdício de tempo e de recursos, a ampliação dos custos e a redução do número de artigos produzidos. Para o solucionamento de tal problema, faz-se necessária a análise das características de influência, partindo das diferentes variáveis utilizadas e suas falhas associadas. Em outras palavras, precisa-se estipular as prováveis causas de danos e, posteriormente, planejar suas soluções.

1.2 Objetivos e estrutura do relatório

O objetivo geral baseia-se na otimização do processo de vulcanização, mais especificamente na etapa de enformação em prensa, de acordo com o diafragma utilizado e com as condições de instalação da prensa.

Os objetivos específicos, propostos pela Continental Mabor, estão descritos na Tabela 1, juntamente a seus descritivos:

Tabela 1: Objetivos específicos de trabalho.

Objetivo	Descrição
I	Determinar as características de inflação de vapor das válvulas proporcionais, de acordo com o KVS utilizado
II	Determinar o atraso de inflação de acordo com as condições de instalação, por família de prensa
III	Determinar as propriedades físicas dos diafragmas utilizados
IV	Ajustar os parâmetros da receita relatada (ganho de eficiência por tempo de ciclo)
V	Simular o escoamento de acordo com as diferentes condições de instalação
VI	Determinar a máxima pressão possível a ser utilizada

O desenvolvimento dos objetivos descritos basear-se-á no estudo de inflação dos diafragmas, através da análise do conjunto de válvulas presente no interior das prensas, mensurando seu funcionamento e o caudal de vapor movimentado, e da influência das diferentes receitas de enformação, que consistem no pacote de pressões e

temperaturas de trabalho. Posteriormente, com a utilização de um *software* de desenho, devem-se expandir tais análises para o tratamento computacional, possibilitando a simulação do escoamento no interior do diafragma, de modo a evidenciar de fiel forma os esforços sofridos pelo material. Deve-se, então, contactar os fornecedores em busca de informações específicas acerca dos materiais utilizados e suas propriedades. Por fim, através da análise dos resultados obtidos, serão elaborados ajustes na receita proposta que visem um processo menos agressivo ao diafragma e, portanto, capaz de gerar uma produção com menos falhas e desperdícios.

A organização deste relatório apresenta-se em seis capítulos base, cujo conteúdo ordena-se tal qual descrito:

1. O primeiro capítulo se destina à introdução do estudo, partindo da apresentação da empresa e do produto, e contextualizando o problema, juntamente aos objetivos a serem desenvolvidos e à metodologia a ser aplicada;
2. O segundo capítulo contém a descrição pormenorizada das etapas do processo de vulcanização, dos seus componentes e funcionamentos;
3. O terceiro capítulo elucida o desenvolvimento dos objetivos e suas diferentes metodologias de resolução, com base no conhecimento reunido no capítulo precedente. Reúnem-se também, neste capítulo, os apontamentos acerca do funcionamento mecânico do maquinário e das possíveis causas do problema, bem como a análise dos resultados obtidos e os ajustes propostos;
4. O quarto capítulo reserva-se às conclusões do trabalho, resumindo-se à reunião dos avanços e objetivos concluídos, acrescido à sugestão de trabalhos futuros;
5. Os capítulos cinco e seis reúnem as fontes de informação utilizadas para estruturar e desenvolver o relatório, e os anexos elaborados.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Processo de vulcanização
- 2.2 Prensa de vulcanização de pneus
- 2.3 Diafragma

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de produção de pneus, em meio fabril, possui diversas etapas que se estendem desde a elaboração do material até os últimos estágios de análise e controle de qualidade. Neste trabalho, estudou-se a vulcanização e a moldagem do pneu, sendo estes os tratamentos finais do produto, tais quais serão descritos e elucidados na sequência do presente capítulo.

2.1 Processo de vulcanização

A borracha em sua forma natural, manufaturada e utilizada pela primeira vez pelos índios americanos, atraiu a atenção dos primeiros europeus em meados do século XVI, com as primeiras excursões espanholas à América (Costa *et al.*, 2003). Apresentando características e propriedades que nenhum outro produto até então conhecido possuía, a borracha mostrou-se um material útil e de versátil utilização devido à sua elasticidade. Não obstante, o material natural, por mais revolucionário que fosse, manifestava grandes dificuldades de tratamento e, após curtos períodos de tempo, apresentava consideráveis perdas de suas propriedades úteis (Shreve, 1977). Tais limitações aplicadas à borracha sólida e natural, originalmente proveniente do tratamento da seiva da seringueira (*Hevea brasiliensis*), são:

- Sob condições normais de temperatura e pressão (0º C e 101,325 kPa), apresenta resistência à manufatura, deformando-se permanentemente;
- Quando aquecida, torna-se flácida e pegajosa;
- Quando submetida a temperaturas inferiores, apresenta crescente rigidez, tornando-se progressivamente inflexível e frágil;
- Após curtos períodos de tempo, torna-se ressequida e passa a exalar maus odores.

As peculiaridades inconvenientes da borracha natural, acrescidas ao seu grande potencial fabril, tornavam-na um material contraditório e de insegura aplicação. Tal condição perdurou até o ano de 1840, quando o estadunidense Charles Goodyear e o britânico Thomas Hancock, embora não se conhecessem, lançaram ao mesmo tempo patentes de um novo processo chamado de “vulcanização”, assim denominado em homenagem à figura mitológica *Vulcano* (deus romano do fogo).

A vulcanização, tal qual aperfeiçoada posteriormente, baseia-se na alteração química das cadeias poliméricas da borracha através da adição de enxofre e de calor.

Em outras palavras, trata-se do processo responsável por tornar a borracha, originalmente plástica, em um material elástico, por meio da formação de uma rede de ligações cruzadas entre as cadeias do polímero (Costa *et al.*, 2003), como ilustrado na Figura 2. Durante o tratamento, de modo a reduzir consideravelmente o tempo de cura, ou seja, o tempo necessário para a ligação das cadeias, utilizam-se catalisadores que atuam como eficientes aceleradores químicos.

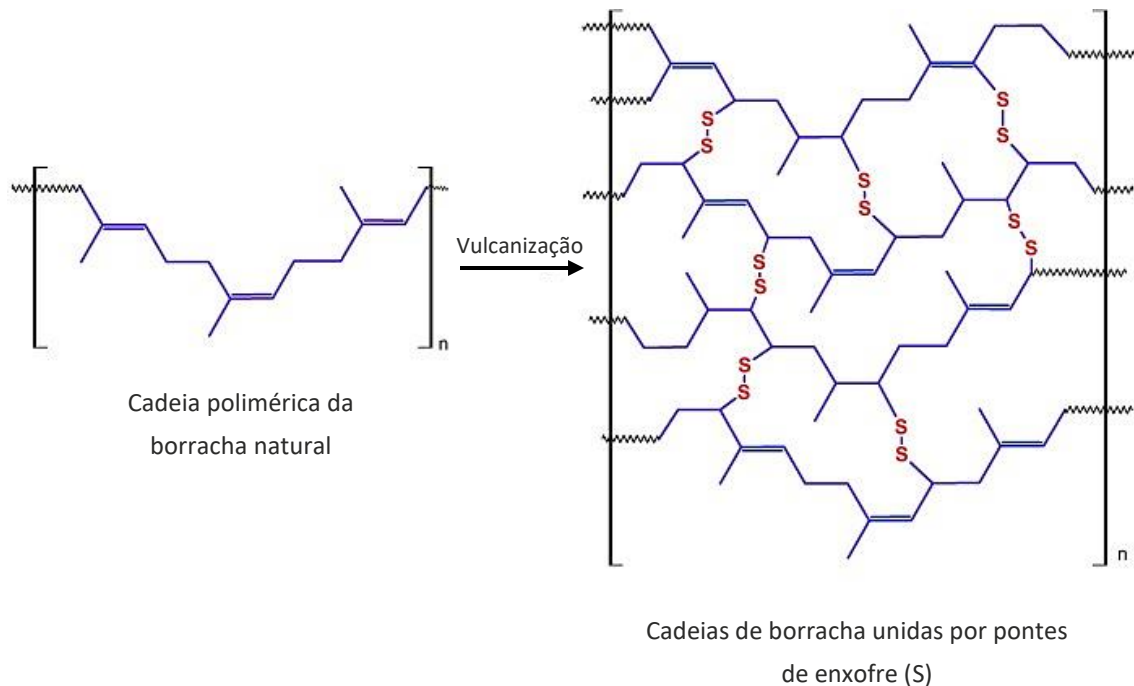


Figura 2: Ligação entre cadeias de borracha natural pela vulcanização (Afinko, 2018).

Segundo Bhowmick (1994) a vulcanização é “o processo pelo qual materiais elastômeros ou borrachas são convertidos em uma cadeia tridimensional através da ligação das cadeias independentes” (Gomes, 2018).

A vulcanização, tal qual descrita, confere ao material propriedades mecânicas essenciais às diversas aplicações na indústria, como na produção de pneus para automóveis e máquinas móveis em geral. Demonstrados na Tabela 2, estão os comportamentos da borracha após o tratamento, justificando o caráter essencial do processo.

Tabela 2: Comportamento das propriedades da borracha após o processo de vulcanização.

Propriedade	Definição (Callister, 2016)	Comportamento
Dureza	Resistência que o material oferece à penetração de um corpo duro	Aumenta
Módulo de Young	Razão entre a tensão e a deformação de um material, dentro do regime elástico em carregamento uniaxial	Diminui

Tabela 2 (continuação): Comportamento das propriedades da borracha após o processo de vulcanização.

Resiliência	Capacidade do material voltar ao seu estado original após sofrer um carregamento uniaxial	Aumenta
Resistência à Fadiga	Resistência de um material à fratura devido a carregamentos cíclicos	Aumenta
Resistência ao Desgaste	Resistência à perda progressiva de material de uma superfície em contato com uma substância externa	Aumenta
Tensão de Rotura	Tensão máxima que um material suporta até sofrer rotura em carregamento uniaxial	Diminui

O pneu possui em sua estrutura uma ampla variedade de componentes e camadas (vide Anexo 1), como diferentes compostos de borracha distribuídos em espessuras desiguais, cujas características divergem entre si. Deste modo, é natural que o processo de vulcanização ideal para cada elemento possua particularidades (de temperatura e tempo de cura), fazendo com que a determinação do processo para o pneu, como um todo, seja uma tarefa complexa (Caetano, 2010). Além da devida caracterização do processo a ser realizado, é preciso, ainda, uma pré-estipulação das condições finais de forma e tamanho do pneu. Uma vez que, durante a vulcanização, o produto será também moldado, aproveitando-se das altas temperaturas de modo a atingir sua forma definitiva.

Este processo, em escala industrial, é realizado por meio de prensas de compressão (podendo ser estas hidráulicas ou mecânicas). Suas etapas de processamento visam fornecer ao pneu as condições necessárias de calor e de pressão, providas tanto pelo interior quanto pelo exterior do material, como demonstrado na Figura 3. As setas vermelhas representam o fornecimento de calor pelo interior (T_{int}) e pelo exterior (T_{ext}), e as setas azuis, o fornecimento de pressão interno (P_{int}) e o externo (P_{ext}).

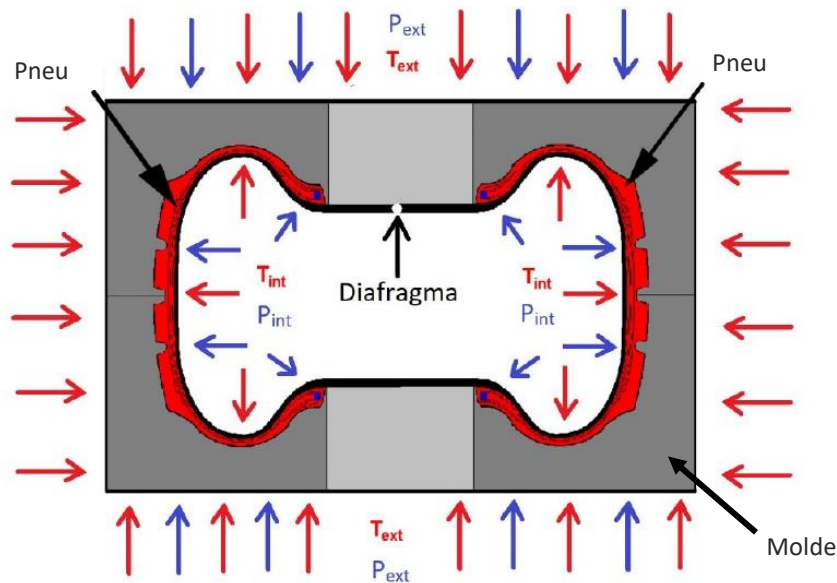


Figura 3: Fornecimento de calor (setas vermelhas) e pressão (setas azuis) sobre o pneu (Pinheiro, 2001).

De acordo com Caetano (2010), o tratamento da borracha através de uma prensa de compressão caracteriza-se por ser um processo descontínuo (há um início, um meio e um fim), por conferir ao material a sua forma definitiva, e por utilizar vapor, fluido térmico ou energia elétrica como fonte de calor para o molde. As condições de funcionamento da prensa, bem como sua caracterização mais detalhada, serão abordadas no decorrer deste trabalho.

2.2 Prensa de vulcanização de pneus

O processo de vulcanização do pneu, simultâneo à sua moldagem, é realizado por um tipo específico de prensa capaz de garantir todas as condições necessárias para a realização do tratamento. Esta prensa, tal qual seus estágios de funcionamento, estão descritas ao decorrer deste subcapítulo.

2.2.1 Ciclo de funcionamento

As prensas de compressão podem possuir diversas características de funcionamento, variando de acordo com a finalidade do produto a ser vulcanizado, com questões ergonômicas e com a necessidade de produção. No âmbito da fabricação de pneus em escala industrial, opta-se por prensas de duas cavidades, como a demonstrada na Figura 4, onde cada cavidade (aberta) está indicada por uma seta; em seu centro encontra-se um diafragma despressurizado, pronto para receber o pneu a ser vulcanizado.



Figura 4: Exemplo de uma prensa de pneus com duas cavidades (Caetano, 2010).

O pneu, anterior ao processo de vulcanização, é comumente chamado “Pneu Verde” (Figura 5), sendo essa denominação também utilizada ao longo deste projecto para a diferenciação entre o produto pregresso ao tratamento e o que deverá seguir para as etapas subsequentes.



Figura 5: Pneu verde (Caetano, 2010).

Antecedendo o processo de prensagem, o interior do pneu verde recebe uma solução de base aquosa responsável por lubrificá-lo para o contacto e acomodação do diafragma, garantindo uma fácil desmoldagem ao findar do processo (Caetano, 2010). Após a aplicação, os pneus estão prontos para serem submetidos à vulcanização, sendo então transportados até a prensa.

As prensas possuem comumente capacidade de produção de dois pneus em simultâneo, através de duas cavidades iguais, cada qual composta por um conjunto de molde e contentor (na periferia) e por um diafragma despressurizado (ao centro). Seus componentes estão representados e indicados por setas na Figura 6.



Figura 6: Cavidade de uma prensa a) em vista frontal (esquerda) e b) em corte (direita).

A cavidade deve receber o pneu verde já lubrificado, que será inserido em seu interior geralmente com o auxílio de um braço hidráulico, chamado “carregador”. O processo de vulcanização deve, a partir de agora, ser delimitado por etapas de acordo com os estágios de atuação da prensa, de modo a facilitar o seu entendimento integral. As etapas seguem, por numeração, a ordem de ocorrência em ciclo. A evolução de pressão total sofrida pelo diafragma, durante todo o processo, está ilustrada na Figura 7, onde as linhas a traço interrompido delimitam o domínio de cada etapa, tal qual será descrita na sequência.

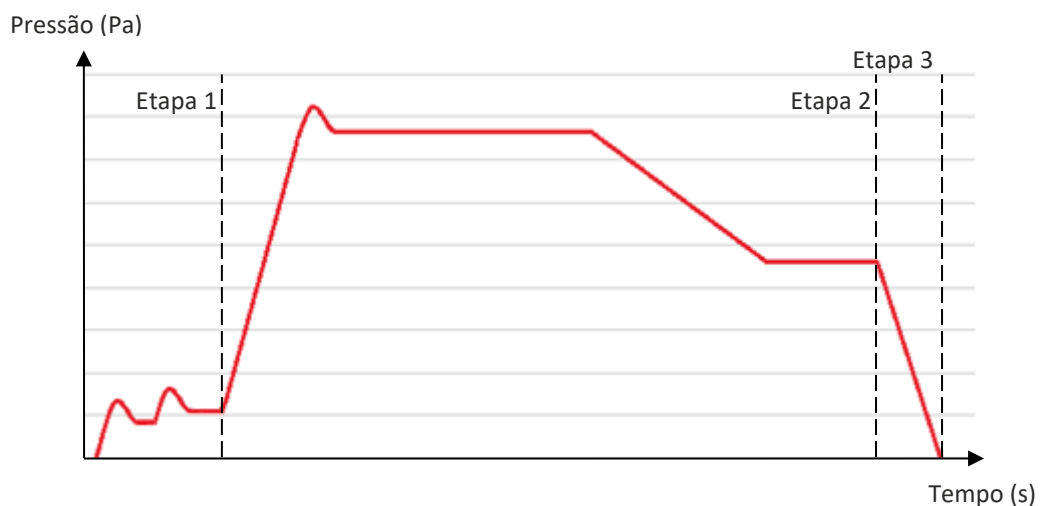


Figura 7: Gráfico da pressão em função do tempo ao longo do processo de vulcanização.

2.2.1.1 Etapa 1 – Inserção do pneu e enchimento do diafragma

A evolução da pressão nesta etapa está ilustrada na Figura 8 (ampliação da primeira parte da Figura 7), onde os pontos A, B e C, tais quais serão descritos posteriormente, representam respectivamente o recebimento do primeiro volume de vapor, a compressão do pneu, e o fim da etapa 1.

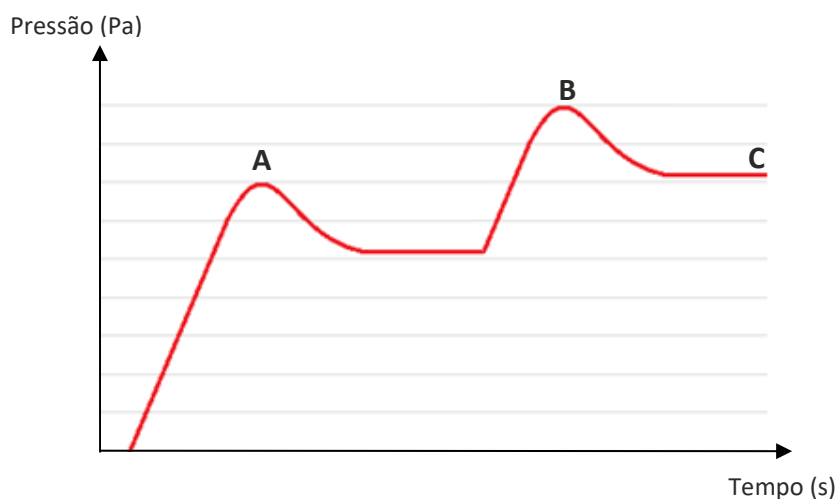


Figura 8: Gráfico da pressão em função do tempo ao longo da Etapa 1.

O pneu deverá ser inserido no meio da cavidade, sendo posicionado de modo que o diafragma ocupe o seu centro. O diafragma, então, passa a ser inflado pelo recebimento de vapor superaquecido, a uma determinada pressão inicial, de modo a atingir o interior do pneu e se alojar firmemente junto à sua superfície (ponto A). Logo após a estabilização, a prensa fecha-se sobre o conjunto, gerando um pico de pressão devido à compressão do pneu (ponto B). A pressão atingida após a compressão, portanto, manter-se-á até o fim da Etapa 1 (ponto C).

O vapor utilizado, correspondente a cada estágio do processo, será fornecido ao diafragma por meio de um sistema de tubulação presente no interior da prensa. A sua distribuição, por etapas, é feita por diferentes tubos de entrada, sendo controlada pelo uso de válvulas *ON-OFF* e proporcionais (vide o tópico 2.2.4).

2.2.1.2 Etapa 2 – Fornecimento de vapor a alta pressão e vulcanização do pneu

A evolução da pressão sofrida pelo material durante esta etapa da prensagem está demonstrada através da Figura 9 (como uma seqüência direta da Figura 8) em função do tempo de duração do processo.

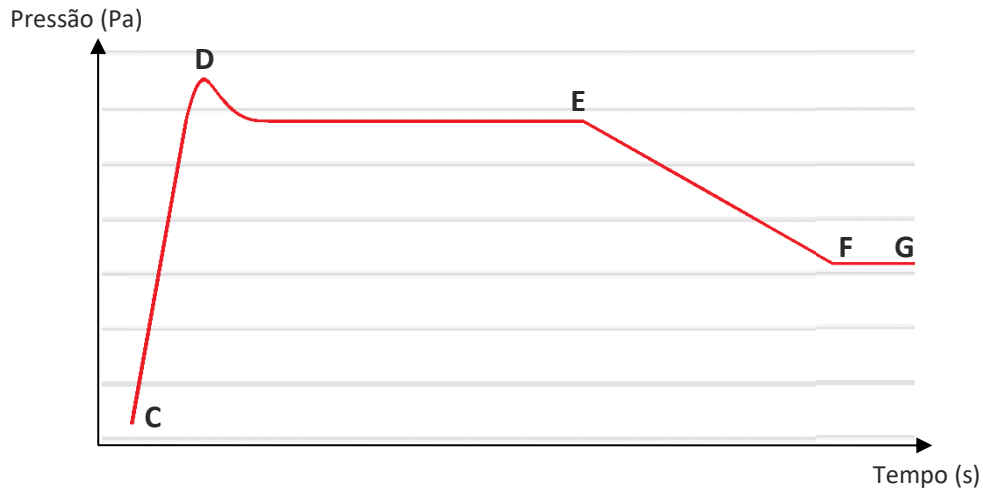


Figura 9: Gráfico da pressão em função do tempo ao longo da Etapa 2.

Ao ocupar todo o espaço interior ao pneu, através do primeiro fornecimento de vapor (ponto C), o diafragma passa a receber um novo caudal de fluido, a uma nova pressão consideravelmente maior que a anterior (ponto D). O diafragma, então, pressionará o pneu contra o molde aquecido que, por sua vez, reagirá ao esforço. Desse modo, como demonstrado anteriormente através da Figura 3, o pneu recebe pressões advindas de seu lado interno (através do diafragma) e de seu lado externo (através da reação do molde), mantendo-se equilibrada e constante. Após determinado tempo (ponto E), a pressão fornecida ao sistema passa a ser gradativamente reduzida, de modo que o processo final da vulcanização ocorre em pressão constante menor (ponto F), até o findar da etapa 2 (ponto G).

2.2.1.3 Etapa 3 – Despressurização e retirada do produto final

As pressões sofridas pelo pneu na última etapa do processo de vulcanização estão representadas pela Figura 10, novamente representando uma sequência direta da Figura 9.

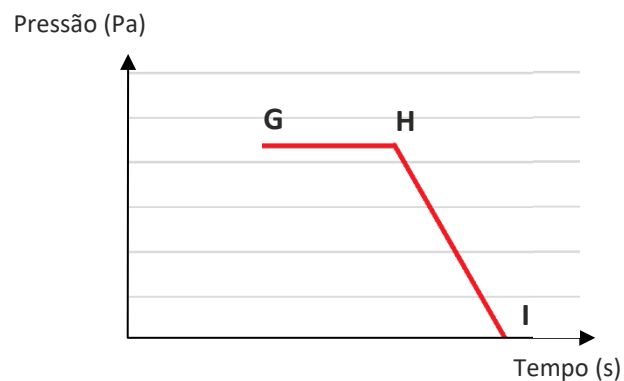


Figura 10: Gráfico da pressão em função do tempo ao longo da Etapa 3.

Decorrido o tempo necessário para a devida vulcanização e moldagem do pneu (ponto G), o diafragma será novamente despressurizado (ponto H) através da sucção do seu vapor interno pelo vácuo de um dos terminais da tubulação, “libertando” o pneu da pressão que o mantinha preso contra o molde (ponto I). O pneu, já vulcanizado e em sua forma definitiva, está apto a ser retirado da prensa e, com o auxílio do braço hidráulico, será pousado sobre uma esteira que o transportará para as próximas etapas da produção, sendo essas a análise e o controle de qualidade do produto finalizado.

Uma ilustração simplificada das etapas da vulcanização em prensa pode ser analisada através da Figura 11, por Pereira (2011), onde a evolução do processo se dá da esquerda para a direita, iniciando-se com o carregamento do pneu na prensa, seguido pelo fechamento da mesma e a subsequente pressurização; ao findar, há a retirada do produto final.

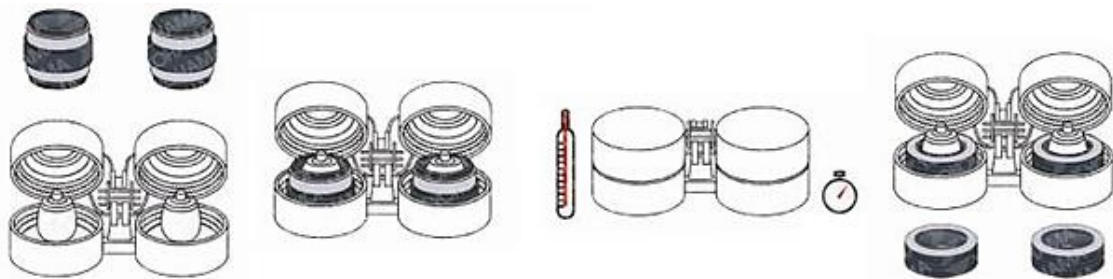


Figura 11: Vulcanização completa em prensa, a) carregamento do pneu verde, b) fechamento da prensa, c) pressurização, d) retirada do produto final (Pereira, 2011).

2.2.2 Molde e contentor

O molde, como um importante componente no processo de vulcanização, apresenta caracterizações de acordo com o tamanho e as especificações do pneu a ser tratado. De modo geral, existem dois tipos essenciais de molde (Caetano, 2010):

- Constituídos por duas partes iguais, cujas metades são aproximadamente simétricas entre si;
- Constituídos por um piso segmentado e dividido em módulos, por paredes laterais, por anéis e por uma flange.

As prensas presentes no meio fabril, tal qual a prensa utilizada neste estudo, utilizam-se de moldes do segundo grupo (segmentados), como representado na Figura 12, tratando-se de “um conjunto de peças que tem a função de dar a forma final que se pretende ao pneu verde, durante a vulcanização” (Gomes, 2018). Vale ressaltar que os moldes não são componentes fixos, podendo ser movidos de uma prensa a outra de acordo com a necessidade.



Figura 12: Molde para um pneu (Continental, 2015).

Deste modo, os moldes utilizados podem ser subdivididos em três superfícies distintas:

- Segmentos (alumínio): São responsáveis por moldar o piso do pneu de acordo com as especificações predefinidas (de modo que cada molde serve somente à um único tipo de pneu). A quantidade de segmentos depende proporcionalmente do tamanho do artigo. Os segmentos para um pneu de inverno estão representados pela Figura 13:



Figura 13: Segmento do molde com piso (Continental, 2015).

- Paredes (liga de aço): São responsáveis pelo formato e pelas informações gravadas nas paredes do pneu. As inscrições geradas (Figura 14) representam informações que devem caracterizar o pneu acerca de seu fabricante, suas dimensões, sua data e local de fabricação, e entre outras especificações. No molde existem duas paredes laterais, a superior e a inferior;



Figura 14: Inscrições informativas geradas pela parede do molde (Continental, 2015).

- Anéis do talão (liga de aço): São responsáveis por moldar o talão de forma a impedir que haja perdas de ar entre o pneu e a jante. Utilizam-se dois anéis, um em cada lado do pneu, sendo um deles representado na Figura 15.

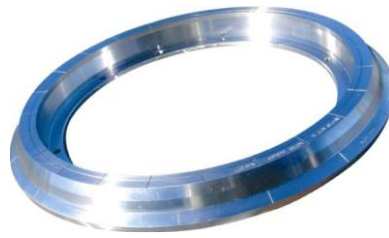


Figura 15: Anel do talão (Moulage, 2016).

A montagem de todos os componentes do molde está ilustrada e diferenciada por cores na Figura 16:

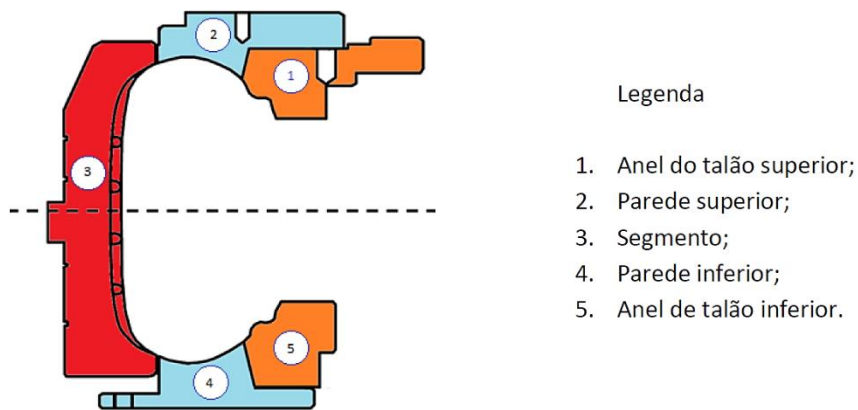


Figura 16: Vista lateral de um molde montado (Gomes, 2018).

No âmbito da vulcanização, de modo a fornecer calor ao material, o molde deve ser previamente aquecido através da utilização de um contentor acoplado ao seu exterior. Este equipamento fundamental possui, em seu interior, canais por onde ocorre a circulação de vapor superaquecido capaz de aquecer todo o mecanismo e, por sua vez, transferir calor ao molde por condução térmica. A montagem do molde, no interior do contentor, está representada através da Figura 17.

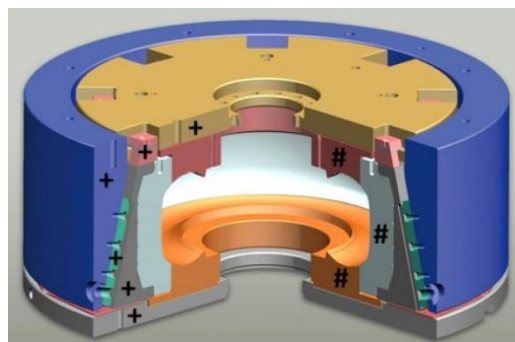


Figura 17: Molde (indicado por #) no interior de um contentor (indicado por +) (Tauforn, 2010).

2.2.3 Tubulações

Além do fornecimento do vapor, o sistema de tubagens também é responsável pela despressurização do diafragma e pelo recolhimento do condensado formado no pneu após o processo de vulcanização (dreno). A tubulação das prensas estudadas possui quatro terminais internos e dois ligados ao diafragma, como demarcado na Figura 18, onde as setas indicam o sentido do fluxo e as cores determinam a entrada (verde) e a saída (azul).

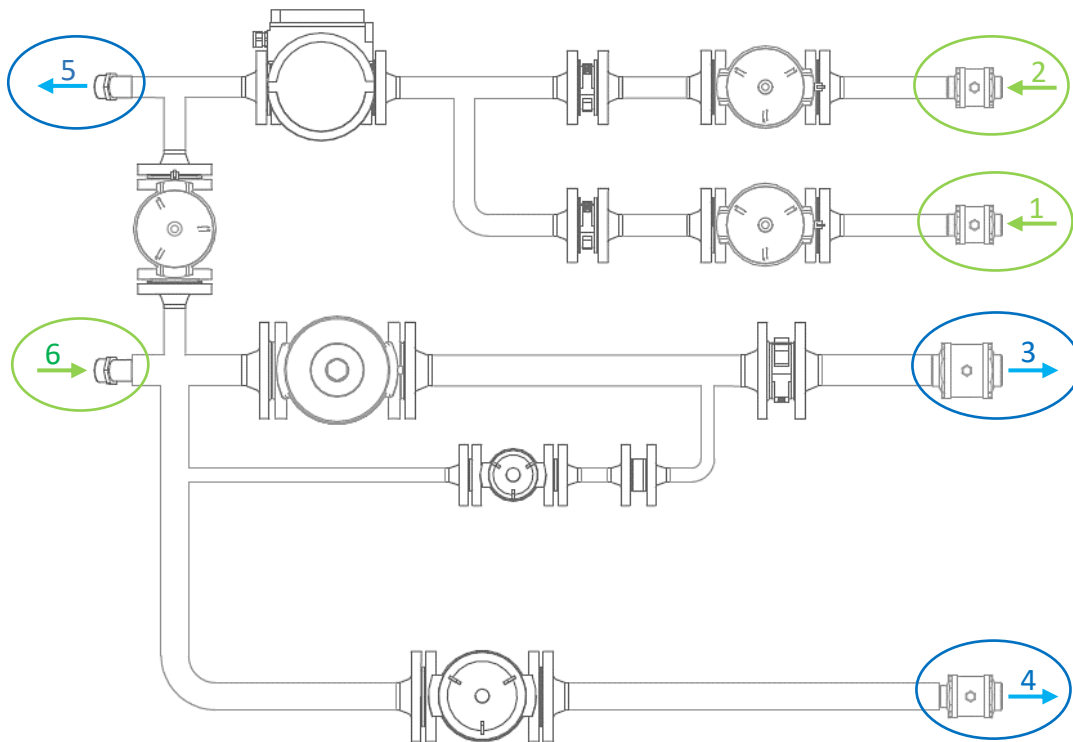


Figura 18: Tubulação de uma prensa de vulcanização, com indicação de terminais.

Os terminais, tais quais apontados na Figura 18, possuem as específicas funções descritas na sequência, cujos estágios de atuação estão indicados de acordo com as etapas de vulcanização definidas anteriormente (vide Figuras 8, 9 e 10):

- Terminal 1: Fornecer vapor ao diafragma (Etapa 1);
- Terminal 2: Fornecer vapor ao diafragma, a alta pressão (Etapa 2);
- Terminal 3: Drenar o condensado presente no vapor de entrada (Etapa 1) e gerado no diafragma durante a vulcanização (Etapa 3);
- Terminal 4: Fornecer o vácuo que deverá despressurizar o diafragma, através da sucção do vapor utilizado durante a prensagem (Etapa 3);
- Terminal 5: Fornecer vapor ao diafragma (Etapas 1 e 2);
- Terminal 6: Permitir a saída de vapor do diafragma (Etapas 2 e 3).

As trajetórias do fluido movimentado nas diferentes etapas do processo estão ilustradas na Figura 19, onde as Etapas 1, 2 e 3 são representadas, respectivamente, pelas cores vermelho, azul e verde.

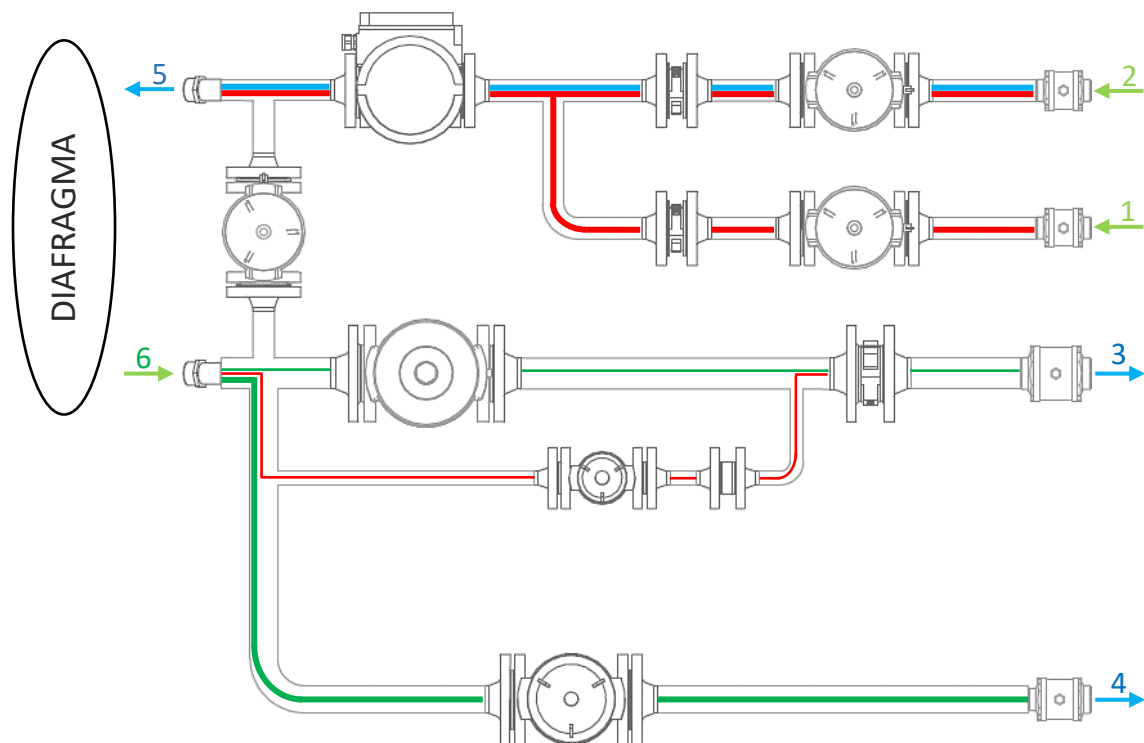


Figura 19: Representação das trajetórias de fluido na tubulação.

Os tubos pertencentes a cada terminal e, conseqüentemente, a cada condição de escoamento, possuem diferentes diâmetros e espessuras, que dependerão do modelo de prensa. Comumente, os tubos 1 e 2 são menores em diâmetro que os tubos 3 e 4, sendo o 3, ainda, o maior dentre eles. Vale ressaltar que, durante a etapa 1, o fluido drenado pelo terminal 3 é apenas uma pequena parcela do fluido total. Ou seja, o vapor a entrar na etapa 1 chegará ao diafragma e somente a parcela com condensado seguirá para ser drenada.

O controle do fluxo, tal qual a regulação da pressão que chegará ao diafragma, é feito através do uso de válvulas *ON-OFF*, uma válvula proporcional, válvulas de retenção e orifícios calibrados. Seu funcionamento está elucidado no subcapítulo 2.2.4.

2.2.4 Válvulas

As válvulas são os componentes do sistema responsáveis por manter as condições de fluxo desejadas durante o processo, tal qual a direção, a pressão e o caudal do vapor utilizado. Seu funcionamento está descrito em estágios (adequando-se novamente às etapas de processo definidas no subcapítulo 2.2.1), onde VO representa

uma válvula *ON-OFF*, VR uma válvula de retenção, VP uma válvula proporcional e OC um orifício calibrado:

- Etapa 1: O processo nesta etapa está ilustrado através da Figura 20, onde a trajetória do fluido está representada em preto, as válvulas *ON-OFF* estão indicadas na cor vermelha, as válvulas de retenção em azul, o orifício calibrado em verde e a válvula proporcional em laranja.

O vapor, ao adentrar o sistema, terá sua passagem permitida pela abertura de VO_A. Em seguida, VR_B garante que o fluido somente escoe em uma direção, impedindo o seu retorno para o Terminal 1. A VP_C, então, é responsável por reduzir e controlar a pressão do vapor que chegará ao diafragma, pelo Terminal 5. Parte do vapor acaba por ser condensado durante a trajetória; esta pequena quantidade de líquido deve retornar pelo Terminal 6 e seguir em direção à VO_D, que permitirá sua passagem até OC_E. Este, por sua vez, permitirá apenas a passagem do condensado, impedindo que vapor remanescente saia do sistema. A atuação de VR_F impede que o condensado retorne, sendo este retirado através do Terminal 3.

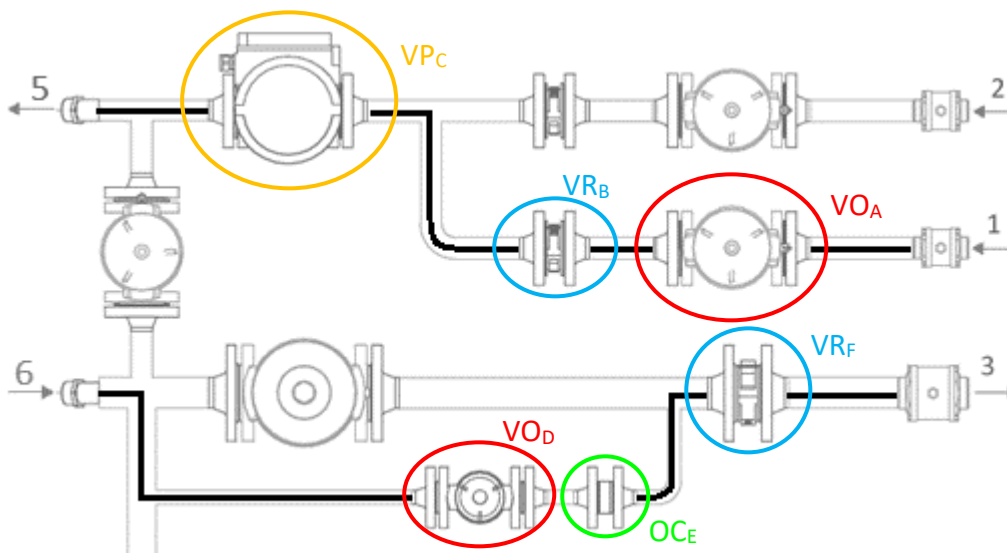


Figura 20: Indicação das válvulas durante a Etapa 1.

- Etapas 2: O processo está ilustrado através da Figura 21, cujas definições seguem as utilizadas na Figura 20. O fluido, agora com maior pressão, é fornecido pelo Terminal 2 e segue para a VO_G, que estará aberta nesta etapa. Após passar por VR_H, o vapor atinge a VP_C, onde terá sua pressão controlada e seguirá para o diafragma. Após a vulcanização, com a abertura de VO_I, o condensado deverá novamente ser retirado através do Terminal 6. O condensado passa então pela VR_F e é retirado pelo Terminal 3.

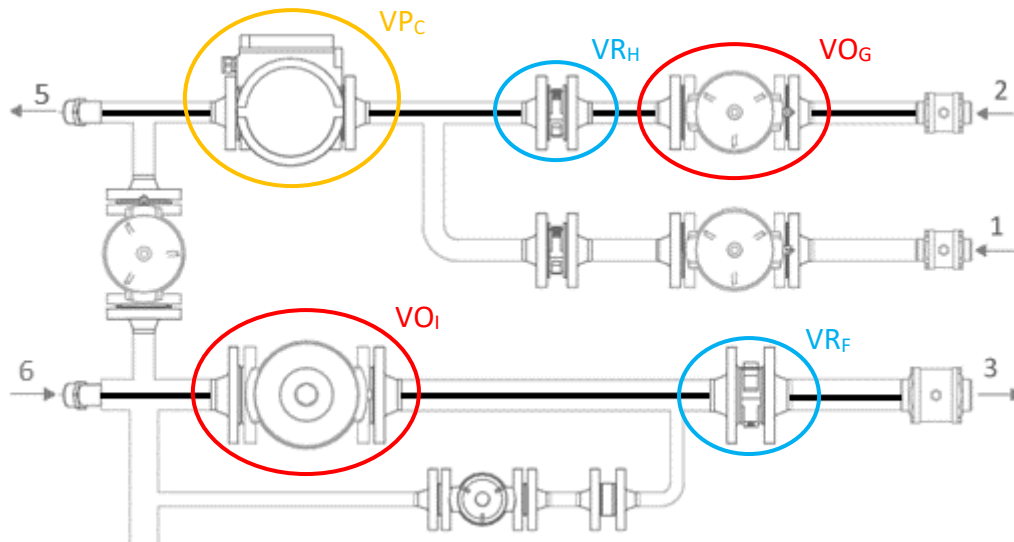


Figura 21: Indicação das válvulas durante a Etapa 2.

- Etapa 3: Conforme indicado na Figura 22, após a vulcanização, o vapor é sugado do diafragma pelo vácuo do Terminal 4, passando por VO_i , que estará aberta. A figura segue as mesmas condições de coloração das duas ilustrações anteriores.

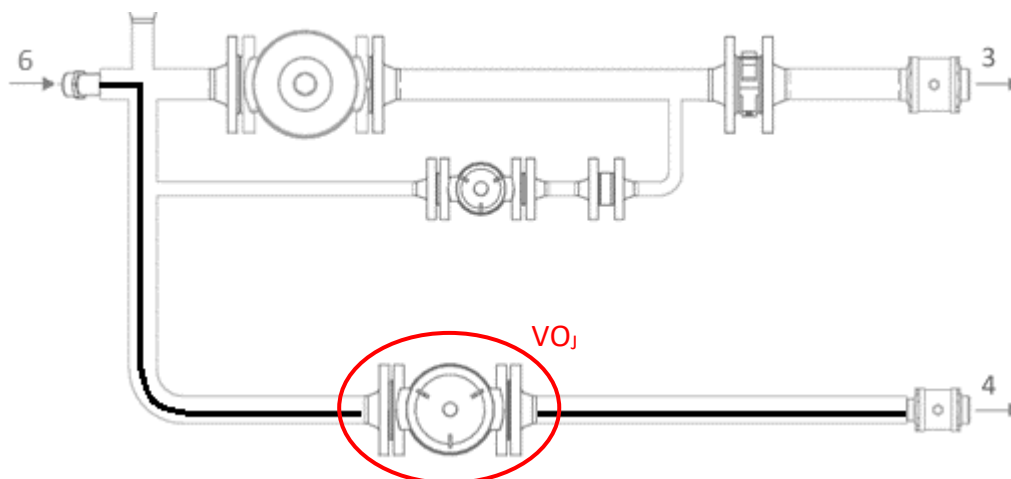


Figura 22: Indicação das válvulas durante o vácuo da Etapa 3.

A condição de cada válvula *ON-OFF*, ao decorrer do processo de vulcanização, está representada por meio da Tabela 3, de acordo com as etapas pré estipuladas, onde as letras “A” e “F” representam, respectivamente, a válvula aberta e fechada:

Tabela 3: Condição das válvulas *ON-OFF* durante a vulcanização.

	VO_A	VO_D	VO_G	VO_i	VO_j
Etapa 1	A	A	F	F	F
Etapa 2	F	F	A	A	F
Etapa 3	F	F	F	F	A

2.2.5 Válvulas de controlo

As válvulas de controlo, tais quais as válvulas proporcionais ou *ON-OFF*, podem ser trivialmente consideradas como um orifício de área variável, cuja secção se destina a adequar as condições de escoamento às desejadas. Possuem, basilamente, duas partes: o corpo (válvula) e o atuador, como demonstrado na Figura 23.

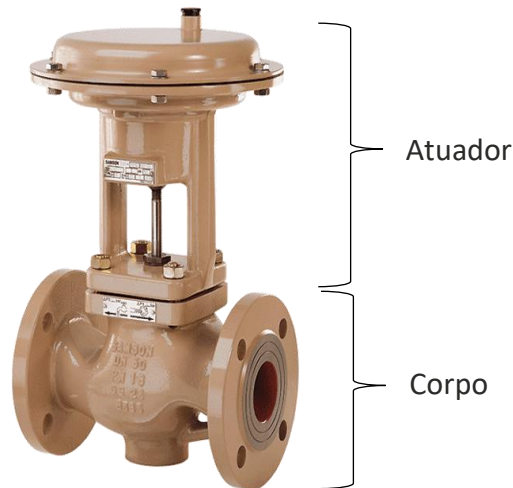


Figura 23: Válvula de controlo (SAMSON, 2019).

As válvulas, tais quais seus componentes internos, estão sujeitos a diversas alterações estruturais que acabarão por caracterizá-la. Tais componentes podem ser visualizados na Figura 24, onde estão indicados por setas:

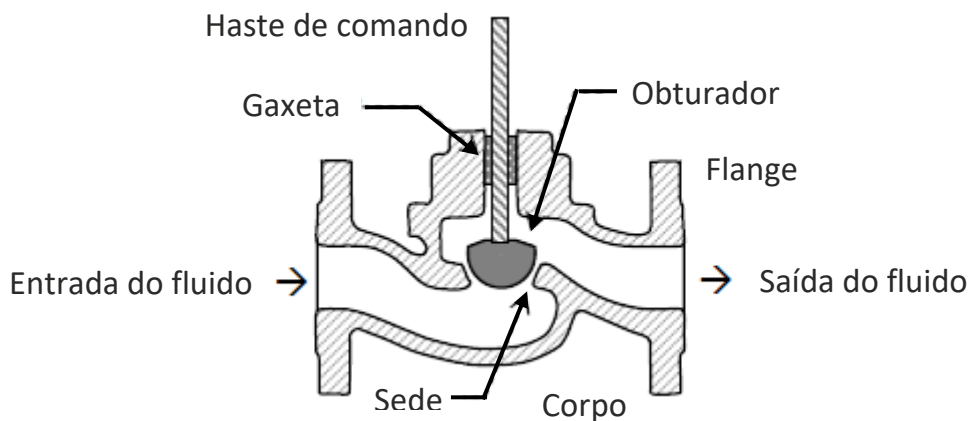


Figura 24: Componentes de uma válvula de controlo (Silva, 2004).

- O corpo é responsável por comportar e permitir a passagem do fluido, de acordo com a movimentação da haste e do obturador;

- O obturador é o componente móvel responsável por obstruir a passagem do fluido pela válvula;
- A haste de comando, unida ao obturador, movimenta-se de acordo com o sinal recebido pelo atuador;
- A sede serve de base para o obturador enquanto a válvula mantém-se fechada, representando a vedação do sistema;
- O atuador representa o controlo da válvula, sendo encarregado da abertura ou do fechamento do canal de passagem do fluido. A atuação de uma válvula pode ser elétrica, hidráulica, pneumática ou manual;
- A gaxeta, ou empanque, realiza a vedação do sistema entre o castelo e a haste;
- O castelo encerra o corpo da válvula (parte superior) e mantém fixos os demais componentes;
- A flange, por sua vez, deve permitir a união entre a válvula e a tubagem à qual está associada.
- As conexões ou vias representam a passagem no interior da válvula pela qual o fluido escoar.

A atuação da válvula pode ser dada de forma manual, por meio de uma alavanca ou volante, ou através de sinais provenientes de um controlador. Este, por sua vez, estando geralmente associado a equipamentos responsáveis pela medição de determinada característica do sistema, como pressão (barômetros) ou temperatura (termopares), fornece um sinal de acordo com os valores lidos, ordenando a movimentação da haste da válvula de modo a atingir ou manter as condições para as quais foi programado.

Uma válvula de controlo deve ser, em termos construtivos, suficientemente resistente, mecânica e quimicamente, para conter o escoamento do fluido (Almeida, 2018). Em frente às condições adversas de operação, como a elevada temperatura, pressão e a poluição do fluido, seus componentes devem resistir à corrosão-erosão (desgaste por corrosão, onde há interação química da superfície do material com o meio externo, associado ao desgaste por erosão, onde ocorre a remoção de material da superfície) e às fraturas associadas a fadiga. Deve também responder em tempo satisfatório aos sinais do controlador, que serão recebidos pelo atuador e transformados em força, movimentando a haste e, conseqüentemente, o obturador.

Ilustrado na Figura 25, o fluxo a passar pela via de entrada é retido pelo obturador, representando uma válvula completamente fechada.

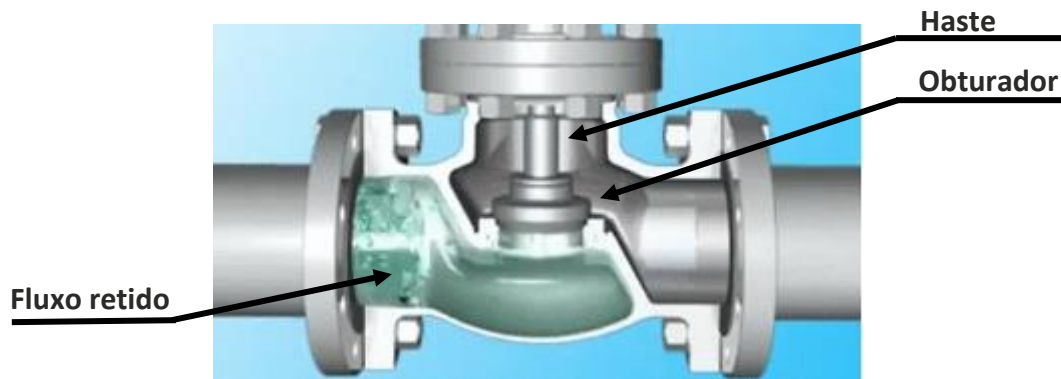


Figura 25: Exemplo de válvula fechada (FBV INC.).

Uma representação da mesma válvula ilustrada na Figura 25, porém aberta (obturador separado da sede), pode ser visualizada na Figura 26:



Figura 26: Exemplo de válvula aberta (FBV INC.).

As válvulas, no geral, podem ser produzidas com uma ampla variação de materiais e dimensões (Almeida, 2018), sendo classificadas de acordo com seus componentes internos, sua atuação, suas características de abertura e entre outros critérios. Representado no Anexo 2 está um esquema básico da correlação entre algumas destas características e das diferentes categorias de válvulas.

Além de tais diferenciações, as válvulas podem, ainda, ser classificadas de acordo com seus limites de abertura, muito embora sua estrutura, componentes e funcionamento sejam bastante semelhantes:

- Válvulas *ON-OFF*, ou válvulas de bloqueio, são destinadas à restrição de fluxo, operando em duas posições: totalmente aberta (*ON*) ou totalmente fechada (*OFF*), permitindo ou restringindo integralmente a passagem do fluido (Solution Controles, 2018);
- Válvulas proporcionais: possuem possibilidade de abertura variável;

2.2.5.1 Válvula proporcional

A válvula proporcional é, em termos de composição e funcionamento, bastante semelhante à válvula *ON-OFF*, sendo esta também uma válvula de controlo. Suas funcionalidades, no entanto, divergem no momento em que o objetivo principal da válvula proporcional é, em resposta aos sinais do controlador, ajustar sua abertura de acordo com o sinal recebido, controlando a pressão de saída do fluxo por meio da restrição da sua área de passagem.

De forma análoga a composição elementar das válvulas de controlo, descrita no subcapítulo 2.2.5, a válvula proporcional pode ser dividida basilamente em corpo e atuador, mas desta vez com o acréscimo do posicionador (Figura 27).

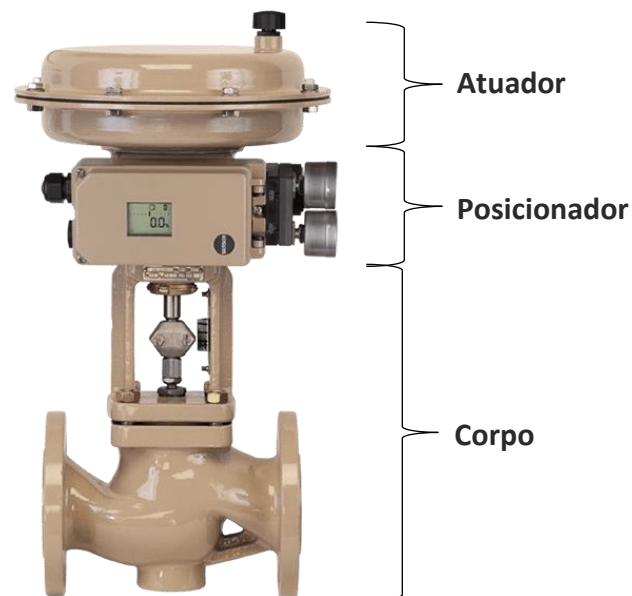


Figura 27: Válvula proporcional com posicionador (SAMSON, 2019).

O posicionador trata-se de um dispositivo electropneumático acoplado à haste da válvula, capaz de auxiliar na otimização do seu funcionamento através do recebimento de um sinal padrão, garantindo uma dada relação pré determinada entre a posição da haste (variável controlada) e o sinal de controlo recebido (variável de referência). O sinal elétrico saído do instrumento de controlo é comparado com o curso da válvula, e um sinal pneumático (variável manipulada) é fornecido ao atuador (SAMSON, 1996). O interior de uma válvula proporcional pode ser visto na Figura 28.

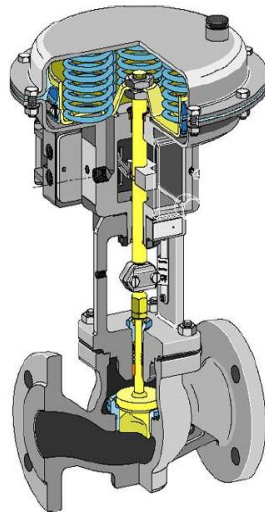


Figura 28: Interior de uma válvula proporcional (SAMSON, 2012).

A função desta válvula é manter constante a pressão a jusante, fechando-se quando esta aumenta. Do mesmo modo que foi demonstrado na Figura 24, o vapor deve escoar pela válvula entre a sede e o obturador, de modo que a posição deste determina o caudal movimentado. A pressão final é transmitida por meio da linha de controle à membrana, onde é convertida em força. Esta força agirá sobre as molas de posicionamento, movendo o obturador.

A relação entre a posição da haste e o caudal escoado pode ser chamada de “coeficiente de escoamento”. Este coeficiente está associado à diferença de pressão entre a jusante e a montante da válvula, dependendo do diâmetro do canal de passagem, do tipo de válvula, da percentagem de abertura e das propriedades do fluido. Para a sua padronização, adotou-se o termo “coeficiente de escoamento”, kv, representando o caudal de água a escoar pelo corpo de uma válvula específica, a uma diferença de pressão de 100 kPa.

Uma vez que o kv de uma válvula depende apenas da sua percentagem de abertura, considera-se que, quando esta encontra-se completamente aberta (haste a 100% de seu curso máximo), o coeficiente se torna o parâmetro KVS, pelo qual as válvulas proporcionais são diferenciadas entre si. Em outras palavras, o KVS representa o caudal volúmico de água que flui através de uma válvula totalmente aberta, quando a queda da pressão entre suas duas extremidades é igual à 100 kPa.

Correspondendo às válvulas utilizadas no processo de vulcanização, as prensas podem ser classificadas como “IND” ou “COM”, de acordo com a característica de fornecimento de vapor para suas cavidades. As prensas ditas “IND” possuem válvulas proporcionais individuais para cada uma das suas cavidades, enquanto as “COM” compartilham a mesma válvula.

2.2.5.2 Válvulas de retenção

Uma válvula de retenção, também chamada de válvula sem retorno ou válvula de sentido único, é um dispositivo mecânico simples cuja função é garantir que o fluido

escoe em apenas uma direção, ou seja, evitar o fluxo reverso em uma tubulação. Diferentes das *ON-OFF*, as válvulas de retenção não necessitam de atuação externa, funcionando automática e independentemente; a sua função é, primordialmente, proteger os elementos contra danos e contaminações do refluxo e fornecer alívio de pressão ao sistema (Silveira, 2016).

Em termos construtivos, são compostas comumente por duas vias, denominadas portas, que permitem a entrada e a saída do escoamento. Dependendo de sua aplicação, podem possuir diversos tipos, tamanhos e materiais, sendo os mais comuns, em meios industriais, representados na Figura 29 (onde “a” representa uma válvula de portinhola, e “b” uma válvula borboleta).



Figura 29: Válvula a) de portinhola e b) borboleta (Cowinns, 2017).

As válvulas de retenção devem também ser classificadas como “normalmente aberta” (onde ela só se fechará perante fluxo reverso) ou “normalmente fechada” (onde ela apenas se abrirá quando o escoamento tiver a pressão necessária para mover a portinhola). Podem também ser diferenciadas pelo uso de molas em seu sistema de obstrução, sendo denominadas “simples” (sem mola) ou “com alívio” (com mola). As válvulas simples (Figura 30) contam apenas com a pressão do fluxo para a sua movimentação e, conseqüentemente, para a retenção do escoamento. Já as válvulas com alívio possuem uma mola associada ao cone de obstrução, mantendo-o assentado quando o fluxo é reverso, e contraindo-se perante a pressão do fluido para permitir a passagem na direção correta.

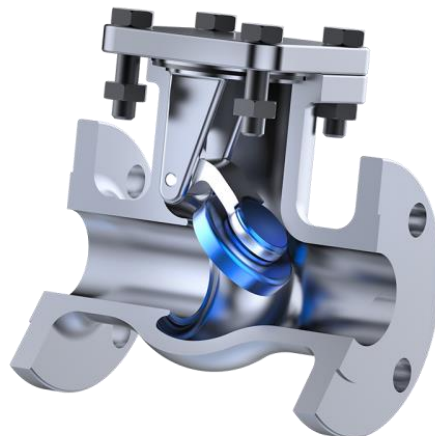


Figura 30: Interior de uma válvula de portinhola simples (JEFFERSON, 2019).

2.3 Diafragma

O estudo do diafragma (Figura 31) constitui uma parte crucial na determinação das condições de vulcanização do pneu, uma vez que representa, devido à sua aplicação em condições hostis, uma das principais fontes de defeitos e sucatas (“scrap” ou “refugos”) do processo.



Figura 31: Diafragma (Caetano, 2010).

O diafragma, sendo responsável por prensar o pneu verde contra o molde aquecido e mantê-lo no lugar correto até o findar do processo, precisa apresentar-se como um bom condutor térmico, resistente à fricção e facilmente conformável pela pressão. Para tal, os diafragmas são comumente fabricados com um composto de borracha butílica (98% isobutileno e 2% isopreno) com 5 PHR (“por cem partes de borracha”) de policloropreno, cujas características são (Caetano, 2010):

- Resistência ao calor;
- Boa condutibilidade térmica;
- Elevada impermeabilidade a gases;
- Boa retenção de pressão;
- Flexibilidade;
- Recuperação elástica.

Tratando-se de um elemento cujo volume interno varia ao decorrer do processo, o diafragma está sujeito a condições de aplicação que influenciam diretamente na sua longevidade, como a fricção com o pneu e a rápida inflação. Tais condições, perante os esforços sofridos pelo material em alta temperatura e pressão, podem gerar danos, como furos e rasgos, que acabam por inutilizá-lo antes do tempo previsto.

Tais inconveniências implicam na necessidade de trocas mais frequentes de diafragma nas prensas afetadas, culminando em um maior “tempo morto” (tempo dedicado à manutenção e à preparação da prensa, sem que o pneu esteja de facto sendo vulcanizado). O acréscimo do tempo morto resulta em um menor “tempo útil” (período no qual a vulcanização de facto ocorre) e, conseqüentemente, em um decréscimo na produtividade.

As características que podem influenciar diretamente no tempo de vida de um diafragma são (Caetano, 2010):

- Qualidade da borracha;
- Dimensões (definem o grau de deformação radial e circunferencial);
- Temperatura de vulcanização;
- Tipo de fluido utilizado no aquecimento (maior ou menor oxidação);
- Pressão utilizada.

Os diafragmas, no geral, são diferenciados por suas espessuras, texturas de superfície e volumes internos, sendo classificados de acordo com o pneu a ser vulcanizado e com a prensa na qual será inserido. Tais características estão listadas no *“Technical Databook: Curing Bladders 2017 / 2018”* (Continental, 2017), onde os diafragmas possuem nomenclaturas específicas através das quais é possível distingui-los. Nos capítulos subsequentes, a diferenciação entre os diversos modelos utilizados será mais profundamente abordada, juntamente aos parâmetros associados à sua utilização, como diferentes pressões e lubrificações.

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Características de inflação das válvulas proporcionais
- 3.2 Atraso de inflação
- 3.3 Propriedades do diafragma
- 3.4 Ajuste de parâmetros
- 3.5 Simulação do escoamento
- 3.6 Pressão máxima de enformação

3 DESENVOLVIMENTO

Para a otimização do processo de vulcanização, cujo principal objetivo baseia-se na redução dos desperdícios, seja de tempo ou de material, o desenvolvimento deste trabalho fundamentou-se na percepção, no recolhimento e na análise de dados reais, através do estudo dos parâmetros de funcionamento das prensas e da realização de testes.

No ambiente fabril da Continental Mabor, adotou-se como característica de diferenciação entre prensas o conceito de “condições de instalação”, sendo elas o conjunto de parâmetros capazes de alterar, em maior ou menor grau, o desempenho da prensa (tempo do ciclo de vulcanização, geração de e, conseqüentemente, número de pneus produzidos):

- O KVS das válvulas utilizadas;
- Configuração da tubulação (varia entre prensas IND e COM);
- Dimensões das tubagens;
- Forma de medição de pressão na entrada e na saída da tubulação (picagem).

A empresa conta com treze diferentes tipos de prensas de vulcanização, cujas cavidades são organizadas por fileiras e numeradas sequencialmente. Visando resultados objetivos, optou-se por centralizar o estudo em uma configuração de instalação específica, de modo a reduzir o número de variáveis envolvidas no processo, posteriormente isolando-as e estudando sua influência particular. Para tal, optou-se pelo modelo de prensa HFM C+K 52", sendo ela uma prensa IND. A tubulação representada anteriormente, na Figura 18, ilustra o seu sistema de tubos.

Almeja-se, no entanto, que as análises e conclusões retiradas deste estudo sejam posteriormente expandidas para os demais tipos de prensas e, conseqüentemente, para as demais condições de instalação, de modo a englobar o funcionamento básico de todos os modelos semelhantes.

Perante os diferentes objetivos atribuídos ao desenvolvimento deste trabalho, a metodologia de resolução utilizada baseou-se em diferentes estratégias de análise, que visaram englobar o problema sob todos os seus aspectos essenciais. O estudo do caso se estruturou, primordialmente, no estudo integral do processo de vulcanização e do seu maquinário, incluindo seus parâmetros e características específicas de funcionamento. Tal percepção permitiu, então, a demarcação das diferentes variáveis envolvidas no processo e sua posterior classificação, de acordo com seu possível grau de influência na ocorrência de falhas e na geração de sucata. Na seqüência, ramificou-se o trabalho e conduziu-se a pesquisa sob metodologias paralelas, cada qual tendo por finalidade a análise do problema sob uma diferente perspectiva, equivalente aos diferentes objetivos propostos.

A correlação entre metodologia aplicada e objetivo almejado pode ser observada na Tabela 4.

Tabela 4: Objetivos e metodologias.

Objetivo	Descrição	Metodologia
I	Determinar as características de inflação de vapor das válvulas proporcionais, de acordo com o KVS utilizado	Análise física do escoamento do vapor; Formulação matemática do problema; Cálculo dos parâmetros estipulados; Resolução numérica por meio da aplicação de fórmulas no Excel®; Resolução numérica por meio de programa no Octave®; Recolha, análise e comparação de resultados e gráficos gerados
II	Determinar o atraso de inflação de acordo com as condições de instalação, por família de prensa	Através da resolução do objetivo anterior, compararam-se os tempos com e sem ajuste de volume total
III	Simular o escoamento de acordo com as diferentes condições de instalação	Recolhimento de plantas e desenhos mecânicos; Desenho do sistema em 3D (tubagem, molde, pneu, diafragma e componentes internos) através do <i>software</i> SolidWorks; Definição dos períodos a serem simulados e determinação dos parâmetros do escoamento a partir dos cálculos do objetivo I; Simulação, recolha e análise de resultados
IV	Determinar as propriedades físicas dos diafragmas utilizados	Pesquisa das propriedades da borracha butílica (material dos diafragmas)
V	Ajustar os parâmetros da receita relatada (ganho de eficiência por tempo de ciclo)	Análise das variáveis de influência na ocorrência de falhas, através do banco de dados da empresa; Elaboração de testes a serem realizados para o suprimento de dados almejados; Simulação do comportamento do escoamento e ensaio de possíveis reações do material; Determinação efetiva dos parâmetros relevantes e seu grau de influência

Baseando-se no banco de dados da própria empresa, buscou-se em registros práticos a manifestação do comportamento real do conjunto, sob as diversas receitas de enformação utilizadas, de modo a inferir a reação do material às diferentes pressões de trabalho. Demais métodos mensuraram o funcionamento físico do processo, a partir da dedução matemática capaz de abranger o comportamento das válvulas utilizadas, caracterizando o escoamento fornecido ao diafragma. Com base nos resultados então obtidos, partiu-se à visualização da evolução do escoamento no interior do diafragma, através da simulação computacional do quadro apresentado.

Em busca da obtenção de dados confiáveis em cenários controlados, optou-se também pela realização de testes práticos acerca das variáveis julgadas pertinentes, tornando objetivo o estudo de cada parâmetro envolvido.

3.1 Características de inflação das válvulas proporcionais

O principal interesse da caracterização do vapor fornecido ao diafragma durante seu enchimento baseia-se na determinação do tempo necessário para sua inflação, representando a duração total da Etapa 1 ou etapa de pré-enformação (vide subcapítulo 2.2.1). Esta consideração, além de indicar o tempo gasto no estágio inicial do processo de vulcanização, auxilia também na posterior análise da influência deste mesmo tempo na fragilização do diafragma, por meio de uma inflação mais ou menos abrupta (em um maior ou menor lapso de tempo). A formulação matemática do problema é desenvolvida na sequência deste capítulo, onde são ressaltadas as características físicas consideradas, partindo do estudo dos diafragmas utilizados.

3.1.1 Diafragmas utilizados

Muito embora os diafragmas utilizados sejam organizados de acordo com as nomenclaturas apresentadas pelo *Technical Databook*, optou-se por diferenciá-los apenas por letras (de “A” à “O”), suprimindo seu nome, a pedido da Continental Mabor. As suas características dimensionais e de superfície estão representadas no Anexo 3, enquanto as propriedades do seu material se encontram no Anexo 4.

3.1.1.1 Determinação do volume interno

O diafragma, apesar de apresentar um volume variável durante as diferentes etapas do processo, possui um volume interno máximo correspondente à sua inflação completa. Este volume depende das suas dimensões específicas que, a despeito da semelhança com um cilindro, apresentam variações de altura ao decorrer do raio. Estas variações fazem com que o cálculo elementar de volume de um cilindro não possa ser aplicado sem correção; deste modo, dividiu-se o raio em três partes, de acordo com cada altura associada. Na Figura 32a, as diferentes partes estão delimitadas e diferenciadas por tramas coloridas; suas alturas e respectivos diâmetros estão indicados na Figura 32b.

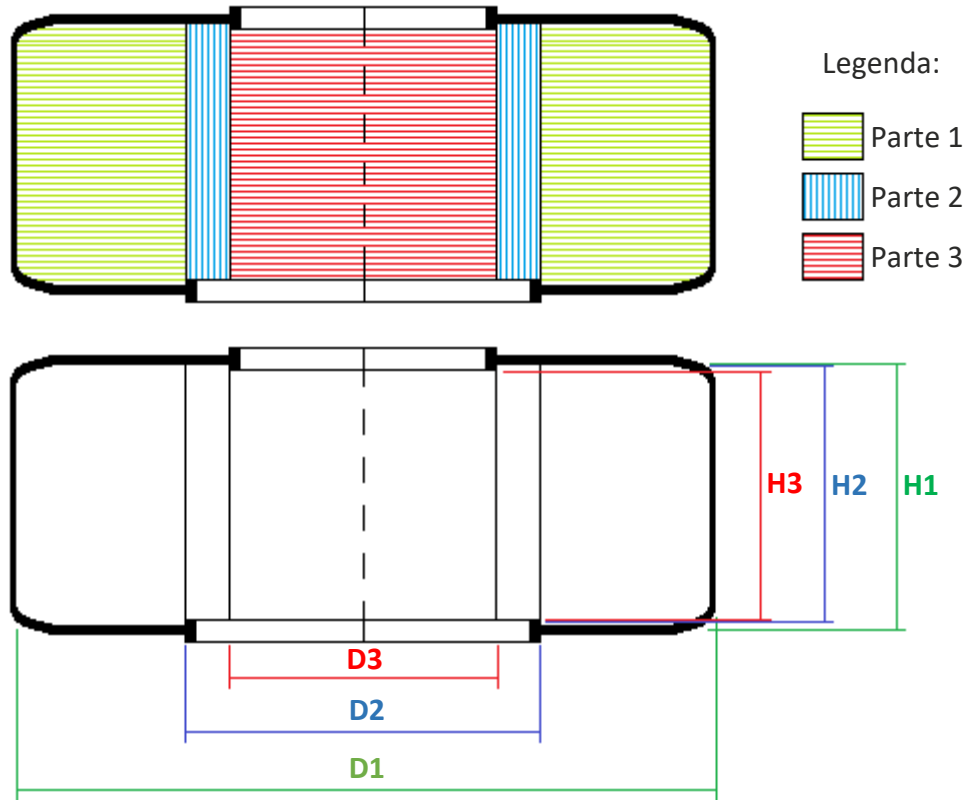


Figura 32: a) Delimitação das partes do volume interno do diafragma e b) suas alturas e diâmetros.

As alturas de cada parte (H_1 , H_2 e H_3) foram determinadas, respectivamente, pelas Equações 1, 2 e 3, onde foram utilizadas as variáveis ilustradas na Figura 60 (Anexo 3), tais quais H para a altura total do diafragma, OH para a espessura horizontal e FW para a espessura da base. Em vista da complexidade de definição da curvatura presente das extremidades do diafragma, sendo esta não uniforme, as extremidades foram consideradas retas.

$$H_1 = H - 2 OH \quad (1)$$

$$H_2 = H - OH - 0,5 FW \quad (2)$$

$$H_3 = H - OH - FW \quad (3)$$

Os diâmetros relativos a cada parte (D_1 , D_2 e D_3) foram determinados a partir das Equações 4, 5 e 6, respectivamente. A seguir, para o cálculo do volume interno total (V_d), elaborou-se a Equação 7. Na sequência, OD representa o diâmetro total do diafragma, DU , o diâmetro da base superior, e DL , o da base inferior. OC indica a espessura vertical, e FH , a largura do apoio para a base.

$$D_1 = OD - 2 OC \quad (4)$$

$$D_2 = DU + 2 FH \quad (5)$$

$$D_3 = DL + 2 FH \quad (6)$$

$$V_d = \frac{\pi}{4} [(D_1 - D_2)^2 \cdot H_1 + (D_2 - D_3)^2 \cdot H_2 + D_3^2 \cdot H_3] \quad (7)$$

Os volumes obtidos para todos os diafragmas utilizados, a partir dos valores do Anexo 3, encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5: Volume interno dos diafragmas utilizados.

Diafragma Utilizados	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	V_d (dm³)
A	260	255	243	451	249	194	16,121
B	256	251	239	481	249	194	18,483
C	292	287	275	497	249	194	22,916
D	355	350	338	591	300	249	40,785
E	271	266	254	491	249	194	20,605
F	302	297	285	511	249	194	25,412
G	297	292	280	651	300	249	42,970
H	367	362	350	651	300	249	53,295
I	249	244	232	511	249	194	20,862
J	230	225	213	541	300	249	21,359
K	251	246	234	541	300	249	23,385
L	249	244	232	561	300	249	25,118
M	309	304	292	561	300	249	31,423
N	265	260	248	591	300	249	30,281
O	289	284	272	591	300	249	33,099

3.1.2 Kv e KVS

As válvulas proporcionais possuem, como descrito no subcapítulo 2.2.5, uma característica intrínseca associada à sua capacidade de inflação. Esta característica, além da classificação da válvula quanto ao caudal movimentado, auxilia também na sua diferenciação. O KVS, apesar de representar um parâmetro padronizado para certo tipo de válvula, cujo fluido de trabalho seja água, pode ser associado diretamente a qualquer válvula, com qualquer fluido de trabalho, através da Equação 8, na qual a variável Q representa o caudal, em m³/s, e o ΔP, a variação de pressão entre a montante e a jusante do componente, em kPa. Ademais, faz-se notar a presença da divisão do caudal por dez, que deve adequar o cálculo para pressões diretamente em kPa (sendo o KVS originalmente elaborado para a unidade de pressão “bar”).

$$KVS = \frac{Q}{10 \cdot \sqrt{\Delta P}} \quad (8)$$

Não obstante, deve-se considerar que o valor de KVS apenas pode ser aplicado diretamente ao cálculo de válvulas cuja abertura seja máxima, ou seja, válvulas com

100% de vazão. Assim, o funcionamento do componente sob diferentes aberturas pode ser caracterizado pelo uso de outro parâmetro, o coeficiente de escoamento k_v , representando o comportamento da válvula em relação ao posicionamento do seu obturador. A Equação 9, equivalente a Equação 8, caracteriza o caudal movimentado sob qualquer percentagem de abertura.

$$k_v = \frac{Q}{10 \cdot \sqrt{\Delta P}} \quad (9)$$

A relação entre os parâmetros k_v e KVS é dada pelo fabricante do componente, na forma de um gráfico, demonstrando o desenvolvimento de k_v em correspondência às diferentes aberturas da válvula, até o atingimento da vazão máxima, ou seja, até igualar k_v à KVS (em 100% de abertura). Como demonstrado na Figura 33, o eixo das ordenadas fornece o valor do k_v em percentagem de KVS , enquanto o das abcissas representa a percentagem de abertura da válvula. Cada modelo de válvula possuirá suas próprias curvas de desempenho, devido às suas diferentes características.

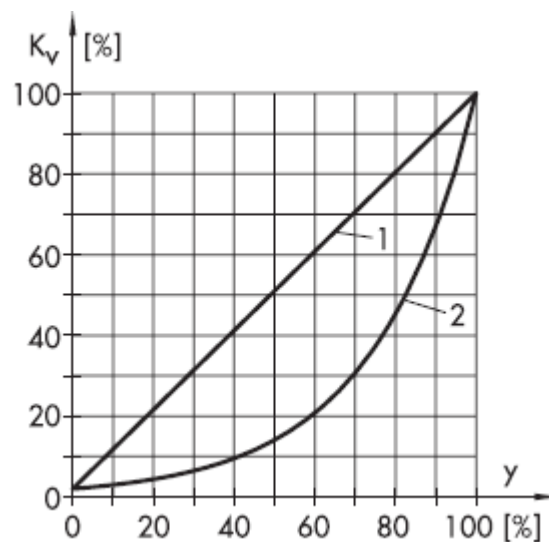


Figura 33: Curva de k_v para diferentes aberturas da válvula proporcional (SAMSON, 2018).

A curva 1, indicada na Figura 33, caracteriza o comportamento da válvula quando sua abertura é linear; já a curva 2, por sua vez, caracteriza uma abertura variável, considerada lenta. A válvula proporcional estudada neste trabalho, utilizada pelo modelo de prensa escolhido, é uma válvula do tipo globo, da marca SAMSON®, sendo o gráfico demonstrado na Figura 33 o seu gráfico específico.

O comportamento estudado é caracterizado pela curva 2, a partir da qual foram retirados os valores de k_v para as diferentes etapas do processo de vulcanização. Tendo por consideração que, para este estudo, a abertura da válvula deve ser considerada constante durante o estágio de pré-enformação, sob uma percentagem pré-determinada pelo operador, então o valor de k_v também deve manter-se fixo.

Assim, optou-se pelo teste de três diferentes percentagens de abertura da válvula proporcional (80, 90 e 100%), cujos valores de kv correspondem, como demonstrado na Figura 34, a aproximadamente 46, 67 e 100% do valor de KVS, respetivamente.

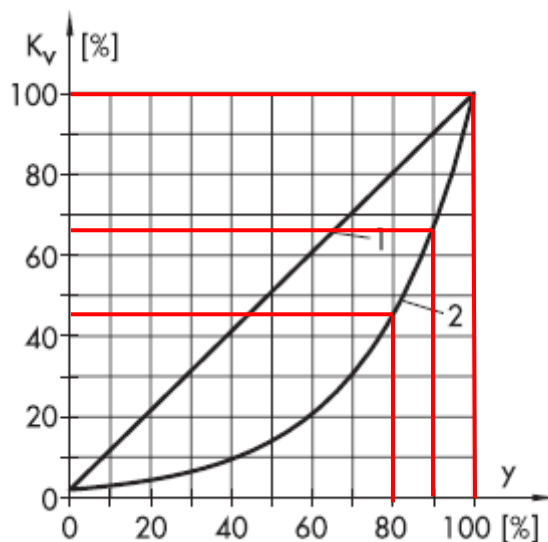


Figura 34: Indicação dos valores de kv utilizados.

Não obstante, deve-se considerar que, em componentes reais, muito embora uma válvula seja classificada por determinado valor de KVS, este pode sofrer pequenas variações, cujo valor real deve ser fornecido pelo fabricante. Assim, optando-se pelo teste de diferentes válvulas em função do KVS utilizado, calcularam-se as características do escoamento para válvulas de KVS 2,5 e 4, cujos valores reais fornecidos são, respetivamente, 2,77 e 4,19.

Deste modo, de acordo com a Figura 34, os valores de kv para as diferentes aberturas estudadas estão listadas na Tabela 6.

Tabela 6: Valores de kv apresentados para diferentes aberturas da válvula proporcional.

Abertura (%)	kv	
	KVS 2,5	KVS 4
80	0,12742	0,19274
90	0,18559	0,28073
100	0,22700	0,41900

3.1.3 Pressões de trabalho

Os ciclos de vulcanização, sendo subsequentes entre si, garantem que no início de um novo ciclo o diafragma se encontre sob o vácuo do fim do ciclo anterior. Deste modo, a sua pressão interna, ideal para a condição do vácuo, deve possuir o valor relativo de -40 kPa (devendo ser garantida pelo sistema de vácuo da fábrica). Assim,

durante o processo de pré-enformação, a válvula deve garantir que, sob abertura fixa, a pressão sofrida pelo diafragma evolua desde a pressão inicial do vácuo, P_i , até o valor pré-determinado pela receita utilizada, P_f , sendo este conjunto definido como a pressão jusante à válvula e, logo, variável. A pressão montante à válvula, P_{mon} , é proveniente do vapor distribuído diretamente pelos canais da fábrica, tendo o seu valor relativo constante e controlado a cada etapa.

Deve-se considerar que os valores de pressão fornecidos pela empresa constituem pressões relativas, devendo estas serem somadas à pressão atmosférica local que, de acordo com o Anexo 5, equivale a 100,3868 kPa. Assim, para o primeiro estágio do processo de vulcanização (pré-enformação), as pressões consideradas constantes assumem os valores de:

- Pressão a montante da válvula (P_{mon}) = 319 + 100,3868 = 419,3868 kPa;
- Pressão inicial, a jusante da válvula (P_i) = -40 + 100,3868 = 60,3868 kPa;

3.1.4 Volume a ser preenchido

O volume total do diafragma a ser considerado para esta análise deve ser tal qual calculado anteriormente e apresentado no Subcapítulo 3.1.1.1, todavia, extraíndo-se o volume ocupado pela haste e pelos anéis, como ilustrado na Figura 35.

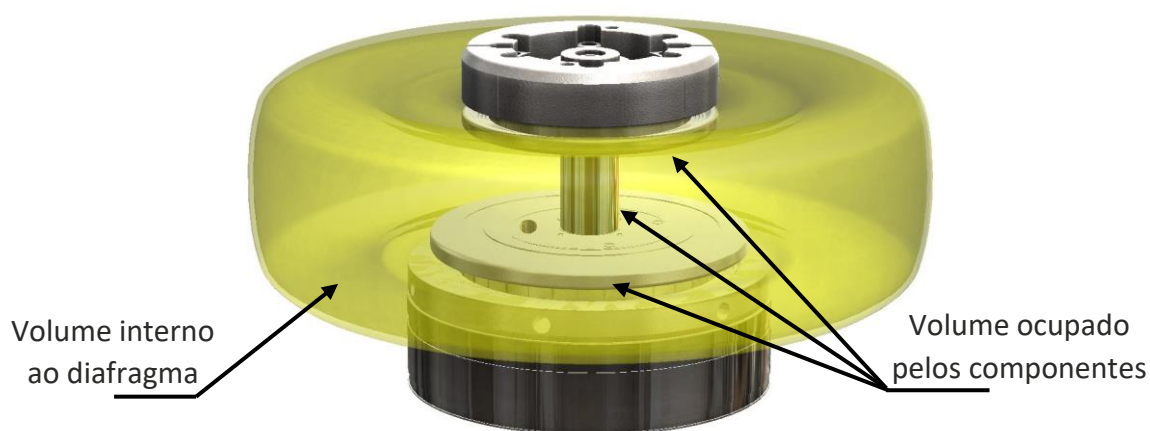


Figura 35: Volume interno real do diafragma em utilização, por SolidWorks.

A determinação do volume se deu por meio do *software* SolidWorks, com base na modelagem dos componentes a partir dos desenhos mecânicos fornecidos pela empresa (Figura 35). Não obstante, o volume final (V) poderia também ser calculado através do volume dos componentes internos (V_c , uma vez que tanto os anéis quanto a haste podem ser considerados cilindros maciços) e sua posterior subtração do volume associado ao diafragma (V_d), como demonstrado na Equação 10.

$$V = V_d - V_c \quad (10)$$

Para tal determinação, faz-se necessário verificar que cada medida de pneu possuirá uma altura específica, devendo esta ser acompanhada pelo diafragma, de modo a garantir a correta prensagem do artigo. Esta altura faz com que a haste, sendo fixa ao anel superior e passante ao inferior, deva ser movimentada por meio de um cilindro hidráulico presente sob o molde e, assim, apesar de manter suas dimensões constantes, possa adequar-se à altura desejada.

Tal movimentação faz com que diferentes porções da haste sejam contabilizadas no volume total do diafragma, em função das diferentes alturas apresentadas. Este ajuste pode ser visualizado na Figura 36, onde estão ilustrados o sentido de movimentação da haste, os componentes internos (com o diafragma em amarelo) e a ligação entre a haste e os anéis. Em resumo, cada modelo de pneu exigirá uma diferente altura do diafragma que, por sua vez, exige maior ou menor comprimento de haste. Este comprimento, associado ao seu diâmetro, gerará diferentes volumes a serem extraídos do balanço interno total.

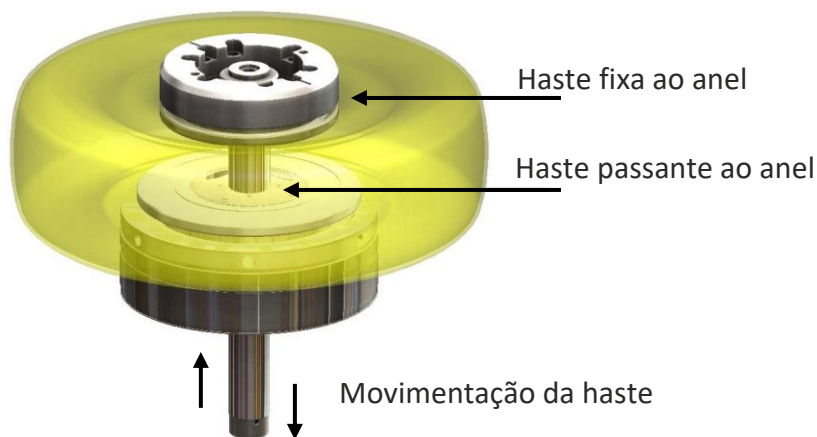


Figura 36: Movimentação da haste para ajuste do diafragma.

O artigo escolhido para análise foi o diafragma A, novamente associado ao pneu de medida mais problemática, tencionando objetivar o estudo através da centralização das diferentes análises em um mesmo componente (uma vez que os testes também visaram este conjunto). Deste modo, através da Equação 10, a partir dos valores apresentados no Subcapítulo 3.1.1.1 e de acordo com o desenho mecânico do conjunto, o volume total assume o valor de:

$$V = Vd - Vc = 0,0161211 - 0,0059189 = 0,0102022 \text{ m}^3 \quad (10)$$

Uma vez definido o diafragma de estudo, define-se também a pressão final a jusante da válvula (P_f), na etapa de pré-enformação, como igual a 35 kPa (primeiros trinta ciclos) e 25 kPa (após trinta ciclos), acrescida da pressão atmosférica, gerando respectivamente as pressões de 135,3868 e 125,3868 kPa.

3.1.5 Formulação matemática

Considerando que o vapor superaquecido, fornecido à prensa sob tais condições de pressão e temperatura (419,3868 kPa e, em média, 484,15 K), apresenta o comportamento de um gás perfeito, a formulação matemática do problema fundamenta-se na “Equação dos gases ideais” (Equação 11), onde P representa a pressão do fluido (kPa), V o seu volume (m^3) e m , a sua massa (kg). T indica a temperatura do vapor em Kelvin (K), considerada constante para todo o processo.

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (11)$$

Por sua vez, R representa a constante universal dos gases que, para o vapor (R_v), assume o valor calculado pela Equação 12, onde R equivale a $8,3144621 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ e M_v , a massa molar do vapor, a $18,01524 \text{ g/mol}$.

$$R_v = \frac{R}{M_v} = 0,000461524 \frac{m^3 \cdot kPa}{K \cdot kg} \quad (12)$$

O caudal mássico de vapor fornecida ao diafragma (\dot{m}), em kg/s, pode ser determinada pela Equação 13, onde Q , novamente, representa o caudal volumétrico associado, em m^3/s . O símbolo ρ representa a densidade do vapor, em kg/m^3 .

$$\dot{m}(t) = \rho \cdot Q(t) \quad (13)$$

Correlacionando a equação anterior à Equação 9, obtêm-se a vazão mássica em função do kv utilizado (Equação 14), onde $P(t)$, representando a pressão a jusante da válvula, varia em função do tempo.

$$\dot{m}(t) = \rho \cdot kv \cdot \sqrt{P_{mon} - P(t)} \quad (14)$$

De acordo com a equação dos gases ideais, a pressão a jusante da válvula pode ser definida em função da variação da massa de vapor, em função do tempo, como demonstrado na Equação 15.

$$P(t) = \frac{m(t) \cdot R_v \cdot T}{V} \quad (15)$$

A partir da união das equações anteriores, define-se a massa interna de vapor presente no diafragma, expressa em kg (Equação 16).

$$m(t) = \dot{m}(t) \cdot t = \rho \cdot kv \cdot \sqrt{P_{mon} - \frac{m(t) \cdot R_v \cdot T}{V}} \cdot t \quad (16)$$

Tendo por base a variação da massa interna do diafragma, Δm , elaborou-se a Equação 17, onde se considera a sua evolução em função do tempo de processo.

$$\Delta m = m(t) - m_o = \int_0^t \rho \cdot kv \cdot \sqrt{P_{mon} - \frac{m(t) \cdot Rv \cdot T}{V}} \cdot dt \quad (17)$$

Novamente a partir da equação dos gases ideais, determinou-se a massa inicial presente no diafragma, m_o , por meio da Equação 18.

$$m_o = \frac{P_i \cdot V}{Rv \cdot T} \quad (18)$$

Finalmente, por meio do tratamento matemático realizado, elaborou-se então a equação final (Equação 19) aplicada ao funcionamento da válvula proporcional por meio da variação da massa interna do diafragma.

$$m(t) = \int_0^t \rho \cdot kv \cdot \sqrt{P_{mon} - \frac{m(t) \cdot Rv \cdot T}{V}} \cdot dt + \frac{P_i \cdot V}{Rv \cdot T} \quad (19)$$

Onde, nesta equação, ρ foi definido como a média entre as massas volúmicas do vapor nos extremos de pressão à jusante da válvula, como demonstrado na Equação 20. O valor do coeficiente kv ($m^3/s/(kPa)^{0,5}$) foi determinado através da Figura 34, de acordo com o KVS da válvula utilizada. A pressão a montante, P_{mon} , mantém-se constante durante todo o processo de pré-enformação, assim como a temperatura, T , e a pressão inicial do diafragma, P_i .

$$\rho = \frac{\rho|_{P_f} + \rho|_{P_o}}{2} \quad (20)$$

Os resultados associados a cada conjunto analisado estão descritos na sequência do presente capítulo, a partir da resolução numérica da Equação 19, tanto pelo *software* científico Octave quanto pela ferramenta Excel.

3.1.6 Resolução

A resolução da equação final se baseia na variação do tempo gasto pelo processo até a massa interna de vapor se igualar à massa final. Esta massa corresponde a Equação 21, novamente baseada na equação dos gases ideais, cujos valores finais para o diafragma estudado (diafragma A) são 6,18 kg (para os trinta primeiros ciclos) e 5,72 kg (para os demais ciclos).

$$mf = \frac{P_f \cdot V}{Rv \cdot T} \quad (21)$$

Deste modo, a variável a ser descoberta deve ser o tempo total gasto, ou seja, “t”, apresentado como o limite superior da integral da Equação 19. A resolução numérica desta equação pode ser encontrada no Anexo 6, juntamente aos demais detalhes do problema, como o programa utilizado, os gráficos gerados e os diferentes acréscimos de tempo testados.

Os resultados obtidos estão demonstrados na sequência deste capítulo.

3.1.6.1 KVS 2,5

Para o diafragma A, por meio de uma válvula de KVS igual a 2,5, os resultados obtidos através da solução numérica estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Tempos de inflação para válvulas de KVS 2,5.

Duração do diafragma (ciclos)	> 30			< 30		
Abertura da válvula (%)	80	90	100	80	90	100
Kv (% de KVS)	46	67	100	46	67	100
Kv (m ³ /s/(kPa) ^{0,5})	0,12742	0,18559	0,277	0,12742	0,18559	0,277
ρ (kg/m ³)	0,4026			0,3729		
M _o (Kg)	2,757			2,757		
M _f (Kg)	6,182			5,725		
t (s)	3,9611	2,7196	1,8221	3,6427	2,501	1,6756

Os resultados obtidos possuem uma considerável semelhança aos valores reais, recolhidos nas prensas de vulcanização. Normalmente, estes valores apresentam maiores períodos de duração da etapa, representando a divergência da situação ideal (calculada) para a real (onde existem perdas de carga, variações de pressão, de temperatura, etc.).

A relação entre a variação do tempo de enchimento, dt, e a pressão final sofrida pelo diafragma, dP_f (de acordo com ciclos superiores ou inferiores a trinta) é dada pela Equação 22, cujos tempos apresentados configuram uma média aritmética dos valores calculados anteriormente.

$$\frac{dt}{dP_f} = \frac{2,8343 - 2,6064}{135,3868 - 125,3868} = 0,0228 \frac{s}{kPa} \quad (22)$$

A relação obtida indica que, em resposta ao acréscimo de pressão imposto ao diafragma (a jusante da válvula), o seu enchimento completo se torna mais lento. Este dado pode ser considerado perante análises e testes de refugo, de modo a determinar a influência da suavização da inflação na ocorrência de falhas.

3.1.6.2 KVS 4

Demonstrados na Tabela 8, por sua vez, estão os resultados obtidos para válvulas de KVS igual a 4.

Tabela 8: Tempos de inflação para válvulas de KVS 4.

Duração do diafragma (ciclos)	> 30			< 30		
Abertura da válvula (%)	80	90	100	80	90	100
Kv (% de KVS)	46	67	100	46	67	100
Kv (m ³ /s/(kPa) ^{0,5})	0,19274	0,28073	0,419	0,19274	0,28073	0,419
ρ (kg/m ³)	0,4026			0,3729		
M _o (Kg)	2,757			2,757		
M _f (Kg)	6,182			5,725		
t (s)	2,6187	1,7979	1,2046	2,4082	1,6534	1,1078

A relação entre a variação do tempo de enchimento, dt, e a pressão final, dP_f, para válvulas de KVS 4, é dada novamente pela Equação 22.

$$\frac{dt}{dP_f} = \frac{1,8737 - 1,7231}{135,3868 - 125,3868} = 0,0151 \frac{s}{kPa} \quad (22)$$

Uma nova relação de influência pode ser escrita considerando-se a variação do tempo de enchimento em função do KVS utilizado. Esta relação se dá pela Equação 23, cujos valores de tempo apresentados são as médias calculadas para cada condição de KVS.

$$\frac{dt}{dKVS} = \frac{1,7984 - 2,7203}{4 - 2,5} = -0,6146 \frac{s}{KVS} \quad (23)$$

O valor resultante representa, então, a economia de tempo de enchimento para válvulas com maiores KVS. No entanto, tal condição representa também uma inflação mais abrupta e, supostamente, mais agressiva ao diafragma, de modo que a veracidade desta colocação deve ser testada por meio da realização de testes de refugo, observando a resposta do componente à variação da receita utilizada.

3.2 Atraso de inflação

Além das variáveis definidas anteriormente, existem ainda considerações que devem ser tomadas para a aproximação do estudo teórico ao comportamento real do sistema. Tais considerações se baseiam na necessidade de reajustes de valores, de acordo com a fidelização da análise.

3.2.1 Volume total

O primeiro reajuste diz respeito ao volume total de vapor a ser fornecido durante o enchimento do diafragma, uma vez que este, apesar do definido anteriormente, não deve ser composto somente pelo volume interno do componente. Para o seu correto balanço deve-se, ainda, considerar a extensão de tubulação existente entre a válvula proporcional e o diafragma, representando assim um acréscimo no volume total a ser preenchido pelo fluido. Ademais, considera-se também a existência de um sistema de tomada de pressão anterior ao diafragma, composto por uma comprida mangueira ligada ao medidor de pressão. Esta mangueira, uma vez que também deverá ser completamente preenchida de vapor, deve ter seu volume contabilizado para o balanço total.

A contabilização total destes volumes por meio do desenho mecânico do sistema (para o volume da tubulação) e da medição manual perante a prensa (da mangueira de tomada de pressão) resulta em um acréscimo de 0,000305363 m³ no volume final, totalizando, para o diafragma A, um valor de 0,01051 m³ a ser preenchido. O acréscimo de tempo de enchimento gerado por tal variação deverá ser considerado um “atraso de inflação”, sendo determinado por meio da diferença entre o tempo atualizado e o anterior ao ajuste. Os novos valores, portanto, estão descritos na Tabela 9, onde os tempos apresentados são médias das condições descritas anteriormente.

Tabela 9: Atrasos de inflação quanto ao volume total.

KVS utilizado	2,5		4	
Duração do diafragma (ciclos)	> 30	< 30	> 30	< 30
t _{médio, sem ajuste} (s)	2,8343	2,6064	1,8737	1,7231
t _{médio, com ajuste} (s)	2,9191	2,6844	1,9298	1,7747
Atraso de inflação (s)	0,0848	0,078	0,0561	0,0515

A partir dos dados apresentados, pode-se calcular a relação de influência entre o volume total e o tempo de enchimento gasto, como definido pela Equação 24, onde dt representa a média do atraso de inflação total, e dV, o volume com e sem ajuste.

$$\frac{dt}{dV} = \frac{0,0676}{0,01051 - 0,01020} = 218,0645 \frac{s}{m^3} \text{ ou } 0,2181 \frac{s}{dm^3} \quad (24)$$

O cálculo realizado, além de mensurar o acréscimo de tempo devido a variação do volume total, também facilita futuros projetos de alteração dimensional na tubagem da prensa, através da definição da sua influência sobre a duração do ciclo de vulcanização. Considera-se, também, que um encurtamento na mangueira da tomada de pressão anterior ao diafragma acarretaria em um menor tempo gasto para sua inflação.

3.2.2 Perda de carga dos canais de distribuição

Ademais, uma segunda observação a ser realizada baseia-se na pressão montante a válvula, sendo esta fornecida pelo sistema de canais da fábrica e, portanto, estando sujeita a perdas de carga durante sua trajetória. Esta perda de carga pode ser observada pela diferença de pressão entre o vapor fornecido às prensas no início e no final da distribuição. Estas pressões correspondem, respetivamente, aos valores absolutos de 419,3868 kPa (como tratado anteriormente) e 394,3868 kPa.

Para a determinação da variação do tempo devido a tais perdas, calculou-se o tempo total de enchimento para cada um dos extremos observados, como demonstrado na Tabela 10, onde os tempos apresentados são, mais uma vez, médias das condições consideradas anteriormente.

Tabela 10: Atrasos de inflação quanto a perda de carga do sistema.

KVS utilizado	2,5		4	
Duração do diafragma (ciclos)	> 30	< 30	> 30	< 30
t _{médio} , início da distribuição (s)	2,8343	2,6064	1,8737	1,7231
t _{médio} , fim da distribuição (s)	2,9679	2,7249	1,9621	1,8014
Atraso de inflação (s)	0,1336	0,1185	0,0884	0,0783

Deste modo, a relação entre a variação do tempo de enchimento em função da pressão a montante da válvula é dada pela Equação 25, onde dt representa a média dos atrasos totais de inflação.

$$\frac{dt}{dP_{mon}} = \frac{0,1047}{394,3868 - 419,3868} = -0,0042 \frac{s}{kPa} \quad (25)$$

Sabe-se, então, que sob maiores pressões, a montante da válvula culmina em menores tempos de inflação. Tal consideração favorece, novamente, o levantamento de dados para futuros projetos de ampliação da fábrica, onde seja necessária a extensão dos canais de distribuição.

3.2.3 Relevância de parâmetros

A partir das análises realizadas, deu-se origem a Tabela 11, onde se correlacionam as diferentes variações e suas influências diretas no tempo total da etapa de pré-enformação.

Tabela 11: Influência de diferentes parâmetros no tempo de enchimento total.

Parâmetro	Variação	Relevância
Receita de pré-enformação, dt/dP _f (s/kPa)	0,0228 (KVS 2,5) 0,0151 (KVS 4)	Média

Tabela 11 (continuação): Influência de diferentes parâmetros no tempo de enchimento total.

Parâmetro	Varição	Relevância
Volume total a ser preenchido, dt/dV (s/dm ³)	0,2181	Alta
Pressão montante a válvula, ds/dP_{mon} (s/kPa)	-0,0042	Baixa

Afirma-se, portanto, que o parâmetro de maior relevância é caracterizado pelo volume total a ser preenchido, demonstrado pela maior taxa de variação, onde se ressalta, novamente, a necessidade do cuidado com as dimensões das tomadas de pressão do sistema. Já a menor influência é dada pela existência de perdas de carga associadas à distribuição do vapor, onde se apresentam variações de pressão correspondentes a ordem das filas.

3.3 Propriedades do diafragma

As propriedades do material que compõe essencialmente os diafragmas, a borracha butílica, estão representadas no Anexo 4. Todavia, considera-se o composto em questão como a constituição básica do material, tendo em vista que cada fornecedor possuirá suas próprias características de composição do artigo, objetivando a superioridade em frente a concorrentes. De igual modo, a Continental Mabor conta com seu próprio fornecimento de diafragmas, sob seus próprios atributos específicos, assim, entende-se por bem manter a confidencialidade do material, apresentando apenas as propriedades do composto básico.

3.4 Ajuste de parâmetros

A principal justificativa à realização deste estudo fundamenta-se na determinação das condições ideais para o processo de vulcanização, através do ajuste de parâmetros de acordo com o aumento da durabilidade dos diafragmas e, conseqüentemente, da redução de falhas e desperdícios. Assim, os principais parâmetros a serem ajustados serão considerados e analisados isoladamente neste capítulo, almejando otimizar o processo por via da análise descentralizada proposta, determinando primordialmente o que são falhas e como elas ocorrem.

3.4.1 Refugos

O termo “*scrap*” (do inglês “sucatear” ou “gerar sucata”), tal qual descrito brevemente do subcapítulo 2.3, representa o evento acidental que culmina no descarte desnecessário de material, ou seja, no desperdício de recursos, podendo este resultar da ocorrência de diversos defeitos ao decorrer do processo de vulcanização.

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se em especial no estudo dos refugos relacionados aos diafragmas utilizados, ou seja, aos diafragmas descartados prematuramente devido a falhas. No geral, estes refugos são classificados em categorias de acordo com sua natureza, sendo a sua ocorrência contabilizada e agrupada no banco

de dados da própria empresa. A categoria analisada por este trabalho é caracterizada pelo código número 60, referente aos diafragmas furados.

No entanto, deve-se ressaltar que todo diafragma, independente do tamanho ou das condições de trabalho, apresentará falhas após determinado período de utilização. Este período é dividido em “ciclos”, que correspondem ao número de pneus vulcanizados, sendo contabilizado a partir da inserção do pneu verde até a reabertura da prensa ao final do processo. Deste modo, para evitar os inconvenientes causados pela rotura abrupta, adotou-se, pela empresa, um número limite de ciclos a partir do qual deve ser realizada a troca preventiva de tais componentes. Este limite é determinado com base na análise empírica do comportamento de cada diafragma, garantindo que a maioria destes não apresente tais falhas, sendo trocado em tempo hábil. Sendo assim, consideram-se refugos código 60 aqueles cujo diafragma apresentou furos antes que o limite de ciclos fosse atingido (cerca de 300 ciclos).

Para a percepção das possíveis causas destes defeitos e seus diferentes graus de influência, adotou-se uma metodologia de pesquisa baseada na análise prática e diária do comportamento tanto das prensas quanto dos diafragmas. Para tal, mostrou-se relevante o levantamento de todas as informações já existentes, seja através de análise direta ou do conhecimento acumulado pelos demais funcionários da fábrica. De modo resumido, os métodos utilizados foram:

- Após o estudo teórico do funcionamento das prensas e da atuação dos diafragmas, decompôs-se a totalidade do processo em parcelas consideradas significativas para a ocorrência da falha, fazendo-se a separação das possíveis variáveis de influência;
- Discutiu-se com os demais engenheiros, integrantes do departamento em questão, acerca de considerações técnicas sobre o caso, considerando sua experiência e familiaridade com o processo;
- Discutiu-se também com os operários da fábrica, mais especificamente com aqueles responsáveis pela troca dos diafragmas, a fim de proporcionar um paralelo entre o processo teórico, estudado até então, e o real.

A compreensão de tal funcionamento, perante condições reais de trabalho, viabilizou um melhor entendimento das variáveis que poderiam, efetivamente, ter influência sobre a falha.

Por fim, após o cumprimento dos tópicos descritos, definiram-se as principais possíveis causas de influência na durabilidade do material, tais quais são descritas na sequência deste trabalho.

3.4.1.1 Possíveis causas

Dentre a completude de processos e esforços sofridos pelo material, os principais parâmetros considerados pertinentes são:

1. Concentração de tensão:

Trata-se da concentração de tensão existente no local de contacto entre o diafragma e o talão do pneu, quando o primeiro se encontra completamente inflado. Tal local está demonstrado na Figura 37, ilustrando uma situação-exemplo cujo dimensionamento é genérico. Os componentes envolvidos e o local de ocorrência da concentração de tensão estão indicados por setas.

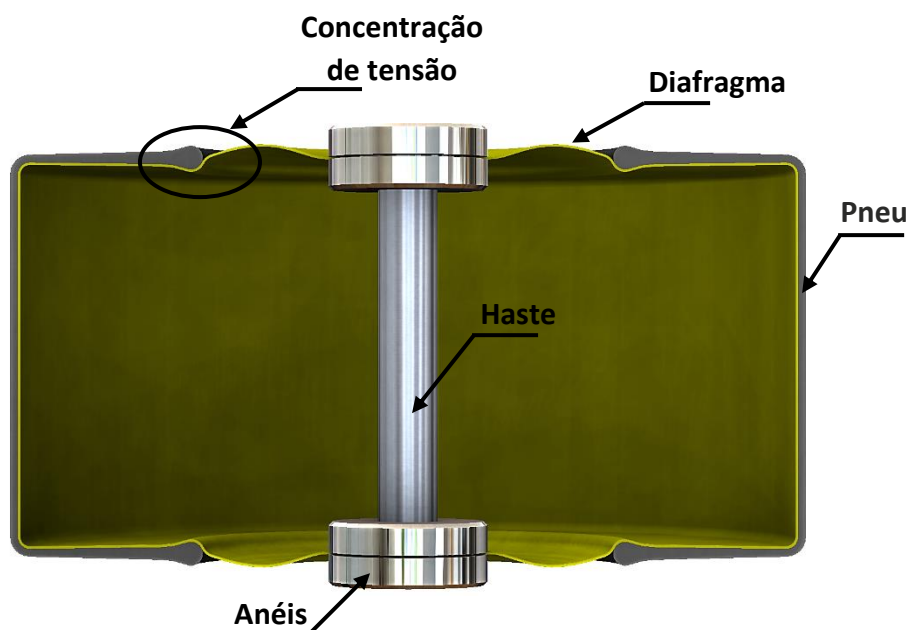


Figura 37: Concentração de tensão no diafragma.

A situação ilustrada ocorre quando o diafragma inflado se expande até os limites do pneu, pressionando-o contra o molde aquecido. Como demonstrado, o diafragma é preso por dois anéis (ou grampos) superiores, fixos à haste, e dois inferiores, através dos quais o vapor é inflado para o interior do conjunto. Estes anéis serão responsáveis por evitar o escorregamento e a evasão do componente, mantendo-o no lugar correto; não obstante, pode-se visualizar através da figura que existe uma distância entre tais anéis e o limite do pneu, representado pela curvatura do talão. Esta distância permite que o material do diafragma, que é expansível e maleável, ultrapasse a altura do pneu e acabe por gerar uma “dobra” sobre o talão, que corresponde ao limite de contenção do componente pelo pneu. A dobra então gerada caracteriza uma concentração de carga, potencializando o desgaste do material e acentuando a sua fadiga, possivelmente culminando na sua falha prematura perante atuações repetitivas. Esta situação pode ser agravada por uma possível distensão da haste, devido à força gerada nos anéis superiores pela pressão do vapor, gerando uma dobra ainda maior.

Para a mensuração da real relevância desta circunstância para a ocorrência dos refugos relacionados, optou-se novamente pela utilização do *software* SolidWorks. Por meio deste, dimensionou-se o sistema real, a partir dos desenhos mecânicos fornecidos pela empresa, e simulou-se o escoamento e suas características. Tal análise, bem como

suas condições e resultados, estão descritos no subcapítulo 3.5. Também deve-se adotar, para a mensuração a partir do histórico de refugos da empresa, que os furos gerados por esta condição encontram-se localizados nos extremos do diafragma, seja superior ou inferior.

2. Pressão de enformação

Considerado um dos estágios mais críticos ao desenvolvimento do processo de vulcanização, a “enformação” é caracterizada pela etapa de inflação do diafragma, representando a rápida distensão do material e o desgaste ao qual é conseqüentemente exposto. Ademais, devido à sua expansão abrupta, o componente encontra-se sujeito à fricção com o interior do pneu verde, a distensões desiguais e a eventuais dobras e retenções de ar entre as duas superfícies de contacto. Muito embora tais situações contribuam à fragilização do material, estas constituem uma consequência direta dos parâmetros de funcionamento utilizados.

O parâmetro de maior relevância ao desenvolvimento deste trabalho caracteriza-se pela receita de pressões utilizadas durante a evolução desta etapa, definindo diretamente o caudal fornecido ao diafragma, a rapidez de sua inflação e as conseqüentes reações do material a tais esforços. Este processo foi anteriormente definido como a “Etapa 1”, no subcapítulo 2.2.1, sendo dividido em dois estágios distintos, a “pré-enformação” e a “enformação”. As duas pressões relatadas estão ilustradas na Figura 38, como uma adaptação da Figura 8, onde a “Pressão 1” representa a pressão utilizada na pré-enformação (primeiro fornecimento de vapor e inflação do diafragma até o preenchimento do pneu) e a “Pressão 2”, a pressão da enformação (segundo fornecimento de vapor visando a pressurização do sistema e a prensagem do pneu contra o molde). Ambas as etapas foram conceituadas nos capítulos anteriores (vide tópico 2.2.1.1).

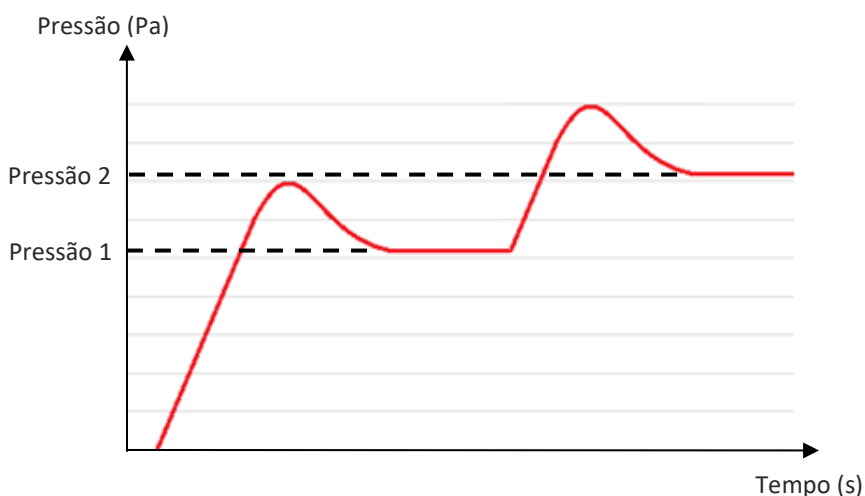


Figura 38: Representação das pressões relatadas na receita da etapa de enformação.

Deve-se ressaltar que, devido às diferenças dimensionais entre os diversos tipos de pneus produzidos, cada “medida” (modelo de pneu) possuirá sua própria receita ideal de vulcanização e, conseqüentemente, diferentes pressões e tempos de enchimento. Como descrito, o principal enfoque deste trabalho baseia-se na determinação destas condições, objetivando a otimização do processo, reduzindo gastos e ampliando a produtividade.

A determinação de tais parâmetros deve-se à análise do banco de dados da empresa, juntamente à realização de testes objetivos que visam o balanceamento entre a pressão utilizada, o tempo de enchimento e as demais reações do material às diferentes condições de trabalho.

3. Lubrificação

Além da pressão utilizada durante a enformação, outro parâmetro de suma importância na determinação dos esforços sofridos pelo diafragma é a lubrificação existente entre a sua superfície e o interior do pneu. Esta lubrificação representará o alívio de fricção entre os dois componentes, tornando melhor o seu ajuste e reduzindo a agressão imposta a ambos os materiais, reduzindo também seu desgaste e a ocorrência de refugos.

Usualmente, durante a sua produção, todos os diafragmas têm o seu exterior lubrificado uniformemente por máquinas, antes de serem fornecidos à fábrica onde ocorrem as vulcanizações. Todavia, uma vez que o componente não volta a ser lubrificado durante todo o período de utilização, considera-se que esta lubrificação seja gradativamente perdida com o número de pneus produzidos. Assim, de modo a compensar tais perdas, costuma-se lubrificar também o interior do pneu verde, garantindo o alívio de fricção mesmo após longos tempos de utilização do diafragma.

Não obstante, deve-se considerar que, em contraparte à proteção gerada, o uso de lubrificantes encarece a produção, seja pela aquisição do próprio produto ou pela maior necessidade humana e instrumental na aplicação do mesmo. Além disto, parte do lubrificante utilizado acaba por atravessar a superfície do diafragma e misturar-se ao seu vapor interior, “sujando” o fluido e gerando maiores complicações no tratamento e reutilização do vapor após a finalização do processo.

Em vista das vantagens e inconvenientes gerados, observa-se a necessidade do balanceamento entre ambas as partes, definindo-se a situação ideal. Baseando-se em tais considerações, a correta mensuração deve ser feita novamente por meio da realização de testes objetivos, isolando-se a variável e analisando seus resultados. Mais uma vez, o desenvolvimento desta metodologia encontra-se nos capítulos seguintes.

4. Dobras do diafragma

Ao findar do processo de vulcanização, de modo a possibilitar a retirada do pneu, o diafragma deve ser despressurizado e, conseqüentemente, ter seu volume interno reduzido. O material, antes esticado, tende a enrugar e apresentar dobras devido à

abrupta redução do seu tamanho, gerando novos pontos de concentração de tensão que tendem a se repetir toda vez que um ciclo de vulcanização é finalizado e o componente volta a “murchar”. Tais dobras podem representar áreas de maior desgaste do material, fragilizando-o e provocando novos furos. Um diafragma despressurizado está representado na Figura 39, onde as dobras em seu material estão indicadas por setas.



Figura 39: Dobras em um diafragma despressurizado (Caetano, 2010).

Para a mensuração da influência real de tais dobras na ocorrência de refugos, considera-se a parte central do diafragma como a mais afetada por tal condição, concentrando os furos nesta região. Estes furos são, então, contabilizados pelo banco de dados da empresa, como demonstrado no subcapítulo 3.4.2.

5. Troca de moldes e diafragmas

O molde, representando o componente responsável pelo aspecto final do pneu, deve possuir o relevo necessário para a moldagem da borracha à sua forma desejada. Assim, sabe-se que cada molde deve servir à vulcanização de um único tipo de pneu, sendo exigida a sua troca perante a necessidade de produção de diferentes modelos.

Uma vez que são os operários os responsáveis pela movimentação dos moldes de uma prensa a outra e pela sua posterior montagem, considera-se que tal condição corresponde a um factor de influência principalmente humana, estando estes sujeitos a eventuais disparidades e, portanto, a geração de refugos. Sendo notada a discrepância entre o número de refugos contabilizados após cada mudança de molde, em frente à quantidade contabilizada normalmente (logo anterior à troca), percebe-se a influência desta condição na ocorrência de falhas. Todavia, mesmo perante a análise dos valores, como discutido no subcapítulo 3.4.2, questões de influência humana não podem ser de facto previstas ou consideradas quantitativamente. Um meio de reduzir tal influência aponta para a padronização e automação do processo, excluindo o factor variante.

Assim como a troca dos moldes, a mudança dos diafragmas também se configura como um factor de influência humana, entretanto, diferente desses, estes devem ser

trocados toda vez que ou existe a ocorrência de uma falha ou seu limite de ciclos é atingido. Durante sua troca, uma série de disparidades acidentais podem ser ocasionadas, desde a fricção do componente com as laterais da cavidade ou com os próprios instrumentos de montagem, como parafusadoras e afins, até a trepidação da empilhadora no transporte do diafragma e desgastes dos testes de vedação (quando o diafragma, após ter seus anéis devidamente fixados à prensa, é inflado diversas vezes em busca de furos ou imperfeições na montagem).

Não obstante, muito embora tal condição possa influenciar no tempo de vida do material, novamente esta não pode ser mensurada, pois trata-se de uma eventual falha humana, sendo acidental e não seguindo um padrão ou regra de ocorrência. O banco de dados da empresa não fornece dados que permitam a comparação entre valores, como ocorre na troca dos moldes.

6. Prensa utilizada

A prensa responsável pela moldagem e vulcanização do pneu, como estudada nos capítulos anteriores, representa, na realidade, um conjunto de parâmetros específicos atribuídos à sua montagem, configuração interna, configurações de funcionamento, entre outros, não devendo ser considerada uma única variável concreta. Deste modo, a sua influência sobre a geração de falhas torna-se uma consequência de diversos outros factores, muitos deles não controláveis (como a condições estruturais da prensa). Portanto, em vista da complexidade de cada família de prensas (modelo), a sua correta análise deve ser descentralizada e dividida em diversas partes, respeitando todas as suas características de funcionamento mecânico.

Ademais, é importante ter em conta que mesmo perante influência comprovada, o modelo de prensa associado não poderá deixar de ser utilizado, uma vez que sua substituição representará, além do grande custo para a empresa, o desperdício de uma máquina útil que, muito embora venha a gerar mais refugos, continua a produzir artigos dentro dos parâmetros de qualidade. Desta forma, optou-se pela análise da ocorrência de furos centralizada nos principais componentes da vulcanização, de influência direta, como o próprio diafragma e os parâmetros de funcionamento, baseados tanto no cálculo do seu funcionamento físico, quanto na análise do histórico de falhas da empresa.

7. Características dimensionais dos moldes e diafragmas utilizados

Tal qual definido, cada medida de pneu a ser vulcanizado deverá contar com um modelo específico de molde e, uma vez que deverão existir diversas prensas produzindo simultaneamente a mesma medida, deverão também existir diversos moldes do mesmo modelo, sendo estes diferenciados numericamente entre si. Deste modo, surgem, no banco de dados da empresa, diversos moldes pertencentes ao mesmo modelo, possuindo exatamente as mesmas dimensões e partes.

Deste modo, muito embora se observe variação do número de refugos

associados a diferentes moldes de uma mesma medida, estes não deve ser considerados factores de influência, uma vez que não possuem variação estrutural.

Os diafragmas, por sua vez, estão atrelados as suas próprias características dimensionais, culminando em limitações físicas e químicas específicas, visto que se encontram sujeitos a diversas condições adversas de utilização, como altas pressões e temperaturas, rápida expansão, fricção, e entre outros. Assim, elaborou-se também a análise entre a percentagem de falha de cada componente em relação às suas características dimensionais, limitando o sistema às dimensões consideradas relevantes. Tal análise baseou-se, novamente, no banco de dados da empresa.

8. Variações do vapor de inflação

De modo análogo ao período do ano, as variações na composição do fluido fornecido ao diafragma compõem um conjunto de possíveis variáveis de influência, mas, desta vez, representando condições internas ao componente. Estas variações, se existentes, apresentam diferentes desgastes ao material. Não obstante, o vapor de inflação tem sua composição padronizada, sendo fornecido sempre sob as mesmas condições químicas e, portanto, não apresentando influência na variação da ocorrência de refugos.

9. Período do ano

Os diferentes períodos do ano, atrelados às características climáticas de cada estação (temperatura e humidade), foram considerados condições externas de possível influência na durabilidade dos componentes. Tais características teriam participação enquanto em contacto com o material, durante o transporte do diafragma para a máquina e nos períodos em que a prensa se encontra aberta. Entretanto, a fábrica, de modo a garantir as condições de conforto dos seus funcionários, já se encontra climatizada. Assim, pode-se considerar que seu interior deverá ter mínimas variações de temperatura e humidade ao longo do ano, independente do mês, tornando desprezável a influência de tais condições na variação do número de falhas.

O levantamento de causas e suas possíveis relevâncias (de acordo com o descrito) pode ser visualizado na Tabela 12, como um resumo dos tópicos abordados acima.

Tabela 12: Possíveis causas e suas condições.

Tópico	Descrição	Condição
1	Concentração de tensão	Relevante, controlável
2	Pressão de enformação	Relevante, controlável
3	Lubrificação	Relevante, controlável
4	Dobras do diafragma	Relevante, não controlável
5	Troca de moldes e diafragmas	Relevante, não controlável

Tabela 12 (continuação): Possíveis causas e suas condições.

Tópico	Descrição	Condição
6	Prensa utilizada	Relevante, não controlável
7	Características dimensionais dos moldes e diafragmas utilizados	Não relevante
8	Variações do vapor de inflação	Não relevante
9	Período do ano	Não relevante

3.4.2 Recolhimento de dados

Uma das duas principais abordagens utilizadas na resolução deste trabalho baseia-se na análise do histórico de falhas da empresa. A contabilidade destes dados ocorre quando o operário, percebendo a ocorrência do refugio, indica ao banco de dados a natureza da falha, a data e o horário da ocorrência, a dimensão do pneu vulcanizado, o molde utilizado, a localização do furo no diafragma, e a posição da cavidade de acordo com a distribuição de prensas na fábrica (organização de prensas demonstrada no Anexo 7). Os dados recebidos são então organizados em duas tabelas, tais quais exemplificadas de modo básico a seguir.

3.4.2.1 Modelo 1

A organização de dados composta pelo Modelo 1, exemplificada na Tabela 13, correlaciona os diafragmas utilizados com o número de refugos registrados a cada semana. Os valores apresentados na Tabela 13 não são reais, servindo apenas para a demonstração da configuração dos valores obtidos.

Tabela 13: Exemplo de tabela de dados, Modelo 1.

Diafragmas	Semana 1		Semana 2		[...]
	Nº de pneus produzidos	Nº de refugos	Nº de pneus produzidos	Nº de refugos	
Diafragma A	152	14	165	18	
[...]					
Diafragma O	180	28	178	36	

O Modelo 1 possui, além da divisão em dados semanais, uma divisão referente ao tipo de lubrificante utilizado, além da classificação por cores dos diafragmas com maiores percentagens de falha, em relação ao número de pneus vulcanizados na semana considerada.

Para o tratamento dos valores recolhidos, optou-se pela análise geral de dados, abandonando-se a divisão semanal. Para tal, somaram-se todos os refugos ocorridos a cada tipo de diafragma utilizado, da semana número 37 (início do mês de setembro) até

a semana 46 (final de novembro) do ano de 2019, posteriormente dividindo tais valores pelo número de pneus produzidos durante o mesmo período (Equação 26).

$$\% \text{ Scraps} = \frac{N^{\circ} \text{ de refugos por diafragma}}{N^{\circ} \text{ de pneus vulcanizados por diafragma}} \quad (26)$$

Assim, possibilitou-se a mensuração real da durabilidade de todos os diafragmas, em percentagem de falha. Tais valores foram, então, unidos aos dados recolhidos anteriormente, tais quais as características dimensionais de cada diafragma e seus volumes internos.

De modo a atender ao pedido da empresa por confidencialidade de dados, os valores presentes na tabela recolhida não serão representados em sua integridade, mas sim as análises e conclusões resultadas deles. Todos os gráficos apresentados foram feitos e adaptados a partir do editor de planilhas Microsoft Office Excel®.

1. Características dimensionais dos diafragmas

Tal qual considerado previamente no Anexo 3, as dimensões utilizadas na caracterização dos diafragmas encontram-se ilustradas na Figura 40, a partir das quais se relacionou a curva de percentagem de refugo dos diafragmas.

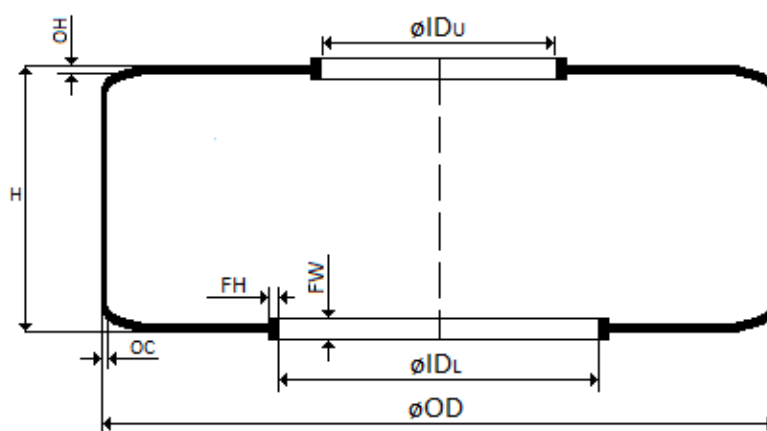


Figura 40: Dimensões de um diafragma (Continental, 2017).

A relação entre tais dimensões e a ocorrência de refugos pode ser percebida através da sobreposição dos gráficos gerados a partir da análise dos dados recolhidos, como será abordado na sequência.

- Espessura vertical (OC)

Ilustrada na Figura 41 está a sobreposição de dois gráficos gerados a partir da tabela composta, descrita anteriormente. No gráfico se correlacionam as espessuras de cada diafragma, em milímetros (valores de eixo à esquerda, colunas em azul), com a

percentagem de refugos sofridos no lapso de tempo analisado (valores à direita, colunas em laranja).

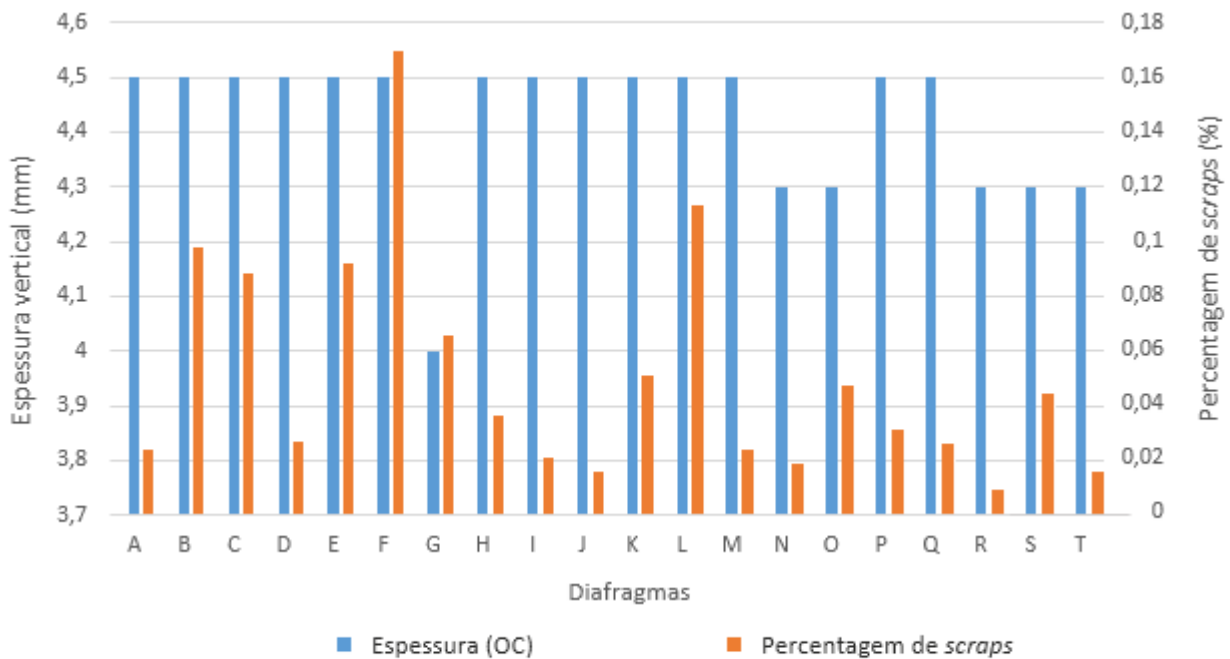


Figura 41: Relação entre espessura do diafragma e ocorrência de *refugos*.

O gráfico gerado demonstra, a partir de tal correlação, a aparente independência entre a ocorrência de refugos e a espessura vertical do diafragma, definindo-se que tal característica não é um factor de importância.

- Espessura horizontal (OH)

Todos os diafragmas utilizados apresentam a mesma espessura horizontal de 7 mm, como foi demonstrado no Anexo 3. Deste modo, uma vez que não existe variação da dimensão, não há meios de mensurar sua influência, sendo esta considerada nula perante as demais variáveis.

- Volume interno

A correlação entre a ocorrência de furos e o volume interno calculado anteriormente está demonstrada na Figura 42, onde, novamente, o eixo à direita (referente as colunas em laranja) apresenta a percentagem de refugo, enquanto o eixo à esquerda (colunas em azul) apresenta os volumes interno, em dm^3 .

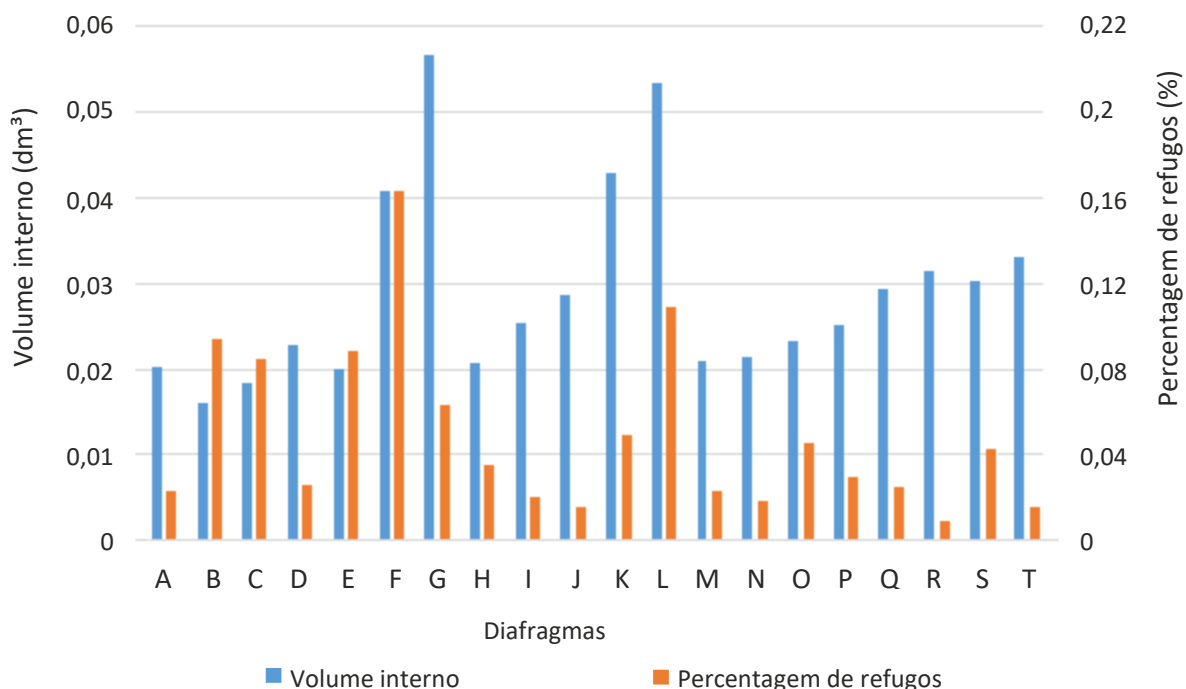


Figura 42: Relação entre volume interno do diafragma e ocorrência de refugos.

Por meio do gráfico gerado, pode-se perceber, através da análise das colunas laranjas em relação às azuis, uma possível influência do volume (e conseqüentemente do tamanho do diafragma) na geração de sucata. Esta característica possui maior relevância durante a etapa de enformação, pois quanto maior o diafragma, maior o tempo que levará para ser inflado e, então, preencher o interior do pneu. Deve-se ressaltar, entretanto, que a escolha do tamanho do diafragma utilizado na vulcanização de um pneu depende diretamente da medida do artigo a ser produzido, uma vez que pneus maiores possuem maior volume a ser preenchido.

Não obstante, além do tempo de enchimento, as variações de tamanho dos diafragmas caracterizam também a receita de pressões utilizadas durante a enformação do componente. Estas pressões serão tanto maiores quanto maior for o tamanho do diafragma, gerando diferentes esforços e desgastes para o material.

Ambas as conseqüências descritas representam um parâmetro de funcionamento (pressão de enformação) e uma resposta direta (tempo de enchimento) ao funcionamento da válvula proporcional, uma vez que esta, estando programada para manter e controlar o caudal fornecido ao diafragma, será responsável pelas características de inflação do componente.

Assim, tomando por base as situações descritas no subcapítulo 3.4.1.1 (possíveis causas de refugo), pode-se determinar que as condições resultantes do aumento de volume dos diafragmas resumem-se ao maior esforço imposto ao material, devido à inflação mais abrupta, e o seu conseqüente desgaste. Não obstante, deve-se considerar que, cada diafragma possui suas características dimensionais, de modo que maiores volumes internos comumente representam também maiores espessuras, que configuram uma maior proteção à ocorrência de furos. Vale lembrar que, além do já

ressaltado, o gráfico apresentado na Figura 42 traz valores reais, ou seja, não existe isolamento de variáveis ou determinação de situações específicas, de modo que os refugos sofridos podem também terem sido influenciados por todos os demais parâmetros de funcionamento associados, como diferentes prensas e moldes, falhas humanas e características exteriores, considerando-se que, novamente, não são fornecidos dados do número de ciclos durados.

2. Receita de pressões utilizada

A receita de pressões utilizadas possui, essencialmente, quatro diferentes pressões pré-programadas (que compõem a programação da válvula proporcional), como demonstrado na Figura 43 (adaptação da Figura 7), onde cada um dos valores de está indicado no eixo das ordenadas.

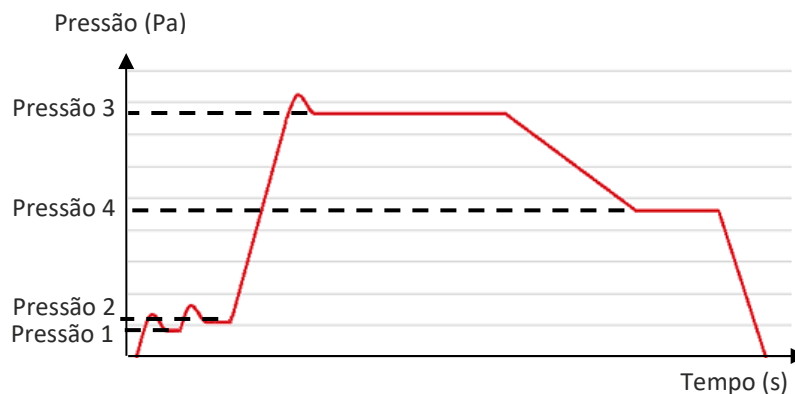


Figura 43: Receita de pressões de vulcanização.

As pressões 1 e 2 representam, respetivamente, as pressões de pré-enformação e enformação do diafragma. Tais quais descritas anteriormente no subcapítulo 3.4.1.1, estas pressões dependem da medida do pneu a ser vulcanizado e, conseqüentemente, do tamanho do diafragma utilizado, apresentando variação entre os diferentes modelos estudados. Já as pressões 3 e 4, correspondendo às duas pressões utilizadas durante a ocorrência da vulcanização, comumente terão o mesmo valor para todos os pneus produzidos, não apresentando variação e, portanto, não podendo influenciar na variação da percentagem de refugo de cada componente.

Ademais, considerando-se o conjunto de pressões 1 e 2 como as pressões que de facto poderão influenciar na variação da durabilidade dos diafragmas, deve-se também ter em consideração que tal receita, perante o mesmo componente, sofre ainda mais uma variação. Muito embora sejam valores pré-estipulados atribuídos a cada diafragma, estes deverão ser ajustados de acordo com o tempo de vida do componente em questão, uma vez que, quanto mais velho o diafragma, menos resistente à tração é o seu material, sendo mais facilmente inflado e, conseqüentemente, necessitando de uma pressão menor de inflação.

O alívio de pressão adotado após trinta ciclos é, comumente, de 10 kPa. O número de ciclos limite para tal variação é estipulado pela empresa, de modo empírico,

de modo a balancear a pressão necessária e o esforço sofrido pelo diafragma. Uma vez que, tal qual demonstrado na Tabela 13, o banco de dados da Continental não fornece a relação entre receitas e diafragmas, foi necessário o recolhimento manual de todas as fichas de identificação das prensas, sendo estas as fichas pertencentes à cada máquina (referentes às duas cavidades utilizadas) responsáveis por informar quais artigos estão a ser vulcanizados, com quais diafragmas e sob quais pressões. As receitas recolhidas para cada diafragma estão listadas no Anexo 8.

Assim, esta análise se ramifica em duas vertentes de influência: a variação das receitas de vulcanização e as pressões para durações maiores ou menores que trinta ciclos. Não obstante, como anteriormente abordado, o banco de dados estudado não fornece o número de ciclos durados antes da falha e, portanto, não há como estipular quais refugos ocorreram antes dos trinta primeiros ciclos, e quais ocorreram depois. Deste modo, serão apenas correlacionadas as diferentes receitas de pré-enformação com a percentagem de refugos contabilizados, sendo esta a responsável pela inflação do diafragma.

- Pressão de pré-enformação

Apresentadas na Figura 44, estão as duas pressões de pré-enformação, correlacionadas com a percentagem de falhas. Como o número de diafragmas a utilizarem cada receita não é igual, novamente, somou-se o número de refugos atribuídos a cada conjunto, dividindo-se pela produção associada, em uma equação semelhante à Equação 26.

Na Figura 44, os valores superiores, no eixo das abcissas, correspondem às pressões para os trinta primeiros ciclos, enquanto os valores inferiores, correspondem ao número de ciclos superior a trinta.

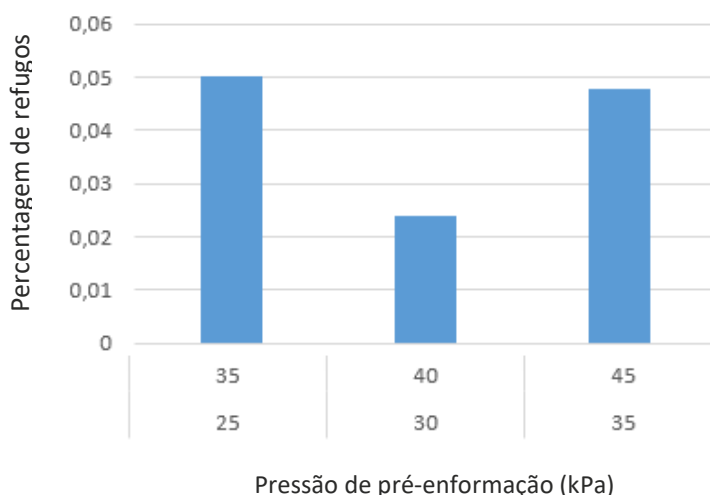


Figura 44: Relação entre a pressão de pré-enformação e a percentagem de refugos.

O gráfico, então, demonstra uma menor tendência à ocorrência de refugos associados à receita de 40 kPa (para os primeiros trinta ciclos) e 30 kPa (para os demais

ciclos). Novamente, os valores abordados não possuem nenhum tipo de isolamento de variáveis ou situações específicas, apresentando dados de falhas que podem ser influenciadas por uma série de parâmetros, não obstante, é notável a diferença de resposta do material a diferentes pressões de pré-enformação, devendo esta influência ser estudada mais profundamente.

A metodologia adotada para o isolamento real de tal influência baseia-se na realização de testes práticos, em situações controladas e objetivas, de modo a ressaltar o parâmetro analisado e mensurar sua relevância. Este teste, tal qual sua metodologia específica, está descrito no subcapítulo 3.4.3.

3.4.2.2 Modelo 2

O segundo modelo utilizado pela empresa, demonstrado na Tabela 14, contabiliza todos os refugos ocorridos, durante todo o período de funcionamento da fábrica. Novamente, a tabela ilustrada traz valores genéricos como exemplo.

Tabela 14: Exemplo de tabela de dados, Modelo 2.

Nº Refugo	Nº Artigo produzido	Dimensão do Pneu	Posição	Molde	Fila	Cav	Data	Hora
1	(0123) 4567	255/55 R 19	Em cima	548265	R	3	12/06	13:48
2	(0245) 5527	205/60 R 16	Centro	478596	B	12	12/06	15:32
[...]								

No Modelo 2, o “Nº do Artigo produzido” representa a contabilidade geral de pneus vulcanizados, indicando o artigo produzido durante a ocorrência do furo. A “dimensão do pneu” representa a sua medida, e a posição, o local no diafragma onde se apresentou a falha. Os dados recolhidos correspondem a todo o ano de 2019.

Para o recolhimento da tabela e sua posterior análise, a Continental forneceu acesso ao histórico de refugos da empresa, instruindo o modo correto de selecionar as variáveis e as datas de ocorrência, garantindo que todos os parâmetros ditos relevantes fossem levantados, englobando todo o período almejado. Após tais seleções, gera-se a tabela contendo os dados desejados, no formato apresentado na Tabela 14.

Além dos dados fornecidos, complementou-se a tabela de forma manual, acrescentando a prensa utilizada (correspondendo às cavidades de cada fila), sua classificação em referência à utilização da válvula proporcional (em IND e COM), o diafragma utilizado (novamente, através do recolhimento de todas as fichas de identificação das prensas, com base na medida do pneu) juntamente à receita de pressões de pré-enformação. Adicionou-se também a posição das cavidades em referência à distribuição “A” e “B” (vide Anexo 7).

Deve-se perceber, no entanto, que este modelo apenas contabiliza os refugos e as suas condições de ocorrência, sem delimitar a quantidade de pneus produzidos sob cada um dos parâmetros abordados, e sem fornecer dados como o número de ciclos de

duração. Uma vez que, portanto, os valores apresentados no Modelo 2 não podem ser utilizados de forma direta para a mensuração da falha associada a cada situação, deve-se recorrer à realização de testes objetivos que sejam capazes de, a partir do isolamento das principais variáveis, fornecer a reação real do material a cada variável.

Não obstante, algumas relações podem, de facto, ser retiradas diretamente desta tabela, tais quais as análises referentes à localização do furo no diafragma, uma vez que esta percentagem de ocorrência depende do número total de refugos, sendo indiferente ao número de pneus produzidos, tal qual demonstrado na Equação 27:

$$\% \text{ posição do furo} = \frac{N^{\circ} \text{ de refugos em cada localização}}{N^{\circ} \text{ total de refugos}} \quad (27)$$

Assim, definiu-se a percentagem de ocorrência de furos em cada posição do diafragma, correspondendo aos dois possíveis casos apresentados no subcapítulo 3.4.1.1 como “Concentração de tensão” (furos nas extremidades (em cima e em baixo)) e “Dobras do diafragma” (furos no centro). Os valores calculados estão relacionados no gráfico da Figura 45.

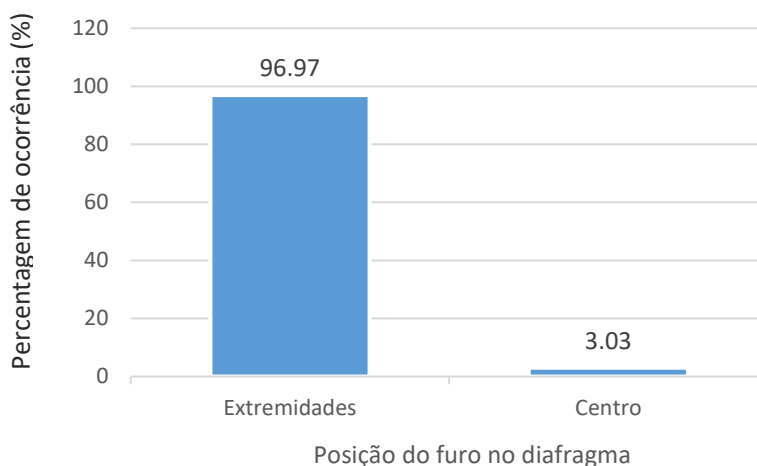


Figura 45: Percentagem de posição de refugos.

A análise do gráfico gerado demonstra uma grande discrepância entre os refugos gerados por concentração de tensão (extremidades), em frente aos gerados pelas dobras do material (centro), representando a relevância desta situação.

Para as demais análises, como descrito anteriormente, deve-se recorrer a realização de testes, não sendo possível a sua mensuração via análise da tabela.

3.4.3 Testes

Os testes elaborados baseiam-se no isolamento de variáveis e na formulação de situações específicas, tencionando a mensuração real da resposta do material a cada factor, sem que este sofra influência dos demais parâmetros envolvidos. Ou seja, os

testes propostos buscam, dentro das possibilidades apresentadas pela empresa, a análise dos principais parâmetros de relevância.

Entretanto, vale lembrar que, uma vez que a realização de testes em um ambiente industrial demanda esforços especiais tanto dos operários quanto da administração da fábrica, como a interrupção da produção de uma prensa, o tempo gasto e a mão-de-obra exigida, as condições de realização e o número de testes devem, além do levantamento dos dados desejados, possuírem as melhores condições para a empresa, aumentando o custo-benefício através da redução dos gastos (tempo e esforço) perante a evidente vantagem dos resultados obtidos (definição das melhores condições de trabalho). Os testes, então, foram elaborados como descrito a seguir.

3.4.3.1 Metodologia

A partir da análise das possíveis causas, levando em conta as condições reais de maquinário, elaboraram-se três testes primários, sendo estes focalizados na receita de pressões da vulcanização, na lubrificação interna dos pneus e nos critérios utilizados para a variação das pressões dentro da mesma receita (padronizada pela empresa em trinta ciclos).

Vale ressaltar que todas as variáveis listadas anteriormente podem ter seu grau de influência em análise individual e específica, não obstante, em uma análise geral, não ser possível atribuir relevância a estes parâmetros devido à sua não variação.

3.4.3.1.1 Teste 1 – Receita de pressões

Este teste, considerado o mais relevante, tem por objetivo mensurar a resposta do material a diferentes pressões de pré-enformação (e, conseqüentemente, a diferentes receitas). Assim, possibilita-se o entendimento da influência da pressão sobre a durabilidade do material, devido às situações descritas no subcapítulo 3.4.1.1 (possíveis causas). Os objetivos deste teste baseiam-se em, basicamente:

- Comparação dos valores recolhidos com os valores calculados de tempo de enchimento (vide subcapítulo 3.1);
- Verificação do tempo de duração de cada ciclo, sob diferentes pressões;
- Verificação da quantidade de ciclos de duração, antes da ocorrência da falha, sob diferentes pressões.

Não obstante, deve-se lembrar que os diafragmas estão sujeitos a um limite de ciclos antes de sua troca preventiva. Assim, nem todos os componentes apresentarão falhas, não contribuindo com a contagem do número de ciclos antes da falha.

Sua metodologia estrutura-se na utilização da medida de pneu mais problemática (tipo de pneu com maior ocorrência de refugos) e o diafragma utilizado usualmente com esta medida. Para o isolamento da variável, é imprescindível que seja sempre utilizada a mesma medida e o mesmo diafragma, através da mesma prensa

(qualquer que seja disponibilizada pela empresa), o mesmo molde e a mesma lubrificação usual.

A medida escolhida conta com o diafragma A (de acordo com a classificação adotada no Anexo 3) e sua receita de pré-enformação possui os valores de 35 kPa (para menos de 30 ciclos) e 25 kPa (para mais de 30 ciclos). As pressões de enformação seguem o padrão de 20 kPa acima das de pré-enformação.

Assim, o teste divide-se em três amostragens, sendo elas definidas por:

- **Amostra A:** Utilização das pressões usuais para o diafragma em questão;
- **Amostra B:** Acréscimo de 10 kPa em ambas as pressões;
- **Amostra C:** Redução de 10 kPa em ambas as pressões;

Cada amostra deve ser realizada durante o período de um mês (devido ao ciclo de vida extenso de cada diafragma). Os dados que devem ser recolhidos são: o número de pneus vulcanizados com cada diafragma testado; o número de diafragmas que apresentaram falha e o número de ciclos de duração antes da ocorrência; e os gráficos de pressão e tempo gerados pela prensa.

Por meio deste esforço, será possível otimizar o processo de vulcanização a partir de um parâmetro de fácil controlo, resultando na redução do desgaste do material.

3.4.3.1.2 Teste 2 – Lubrificação

De modo semelhante ao teste de pressão, o teste de lubrificação deve combinar o melhor custo-benefício, visando o levantamento dos dados necessários perante o mínimo custo associado para a fábrica. Todavia, é devido ressaltar o sistema de lubrificação adotado pela empresa, de modo a perceber os principais parâmetros específicos a serem abordados.

Existem dois diferentes tipos de lubrificantes em utilização pela fábrica, em conformidade com o tamanho do pneu a ser vulcanizado. Essencialmente, estes dois produtos possuem diferentes custos de aquisição, uma vez que devem garantir a integridade das maiores ou menores medidas. Entretanto, em vista da consolidação do lubrificante usado, não sendo esperado alterá-lo, o factor de relevância a este trabalho caracteriza-se pelo sistema de aplicação utilizado, mais especificamente, pela escolha de quais pneus serão lubrificados, tendo em consideração que nem todos os artigos terão o seu interior preparado.

Após o fim da etapa 3, ou o estágio de “construção” (vide subcapítulo 1.1.2), os pneus são transportados até a área de vulcanização (prensas) através de componentes chamados “carros de pneus” Figura 46. Estes carros são constituídos por três ou quatro prateleiras horizontais, dispostas verticalmente, capazes de sustentar um certo número de pneus (tanto em peso, quanto em tamanho) em cada um de seus andares.



Figura 46: Carros de pneus (Silva, 2016).

O sistema de lubrificação utilizado baseia-se na organização dos carros de transporte, onde, de acordo com a medida a ser vulcanizada, distribuem-se os artigos lubrificados e os não-lubrificados em uma sequência específica, consoante a prateleira e a ordem apresentada. Esta sequência tenciona corresponder o mais adequadamente possível às necessidades de lubrificação relacionadas ao tamanho da medida em questão.

Todavia, deve-se reconhecer que este sistema é empírico, desenvolvido sobre a análise prática do comportamento dos componentes. Assim, o teste elaborado propõe o estudo objetivo e parametrizado das vantagens e desvantagens da variação da lubrificação utilizada, levantando-se também as inconveniências associadas tais mudanças.

Assim como no primeiro teste proposto, este teste deve contar com três diferentes amostras de dados, cada uma com a duração de uma semana. Novamente, a medida escolhida foi a com maior número de refugos, associada ao diafragma A. Ambas as amostras devem ser feitas na mesma prensa, com o mesmo molde e sob a mesma receita de pressões. As diferentes amostragens são:

- **Amostra A:** Utilização da lubrificação usual para o diafragma em questão;
- **Amostra B:** Lubrificação de todos os pneus a serem vulcanizados;
- **Amostra C:** Abstenção da lubrificação em todos os artigos.

Ademais, por ser aplicada por máquinas, considera-se que a distribuição do lubrificante no interior do pneu é uniforme e padronizada, anulando a influência humana.

3.4.3.1.3 Teste 3 – Características do diafragma nos primeiros ciclos

Como descrito anteriormente, cada medida de pneu possui sua receita de pressões, que corresponde ao valor das diferentes pressões utilizadas durante o processo de vulcanização. Não obstante, dentro da mesma receita, os valores de pré-

enformação e enformação sofrem uma redução após certo número de vulcanizações (ciclos), pois considera-se que o material dos diafragmas, após este tempo, apresenta menos resistência à expansão. Não obstante, considerou-se relevante a mensuração de tal efeito, a partir da análise do diafragma durante os primeiros ciclos de utilização. Uma vez que não é possível retirar o componente da prensa para medir a sua espessura após cada vulcanização, a mensuração passível de ser feita baseia-se na evolução da temperatura do diafragma.

Deste modo, uma vez que esta redução se dá no limite de trinta ciclos, deve-se, com o auxílio de um termómetro a laser, medir a temperatura do diafragma a cada cinco ciclos (durante a abertura da prensa) até o atingimento do limite, resultando em seis medidas de temperatura para cada diafragma. Para a coordenação dos testes e a simplificação dos esforços, esta sequência de dados deve ser retirada cinco vezes, durante a decorrência da “Amostra A”, do teste de pressão (primeiro teste). Assim, serão trinta diferentes temperaturas, distribuídas em cinco amostras.

3.4.4 Resultados

Devido ao tempo necessário para a realização dos testes, uma vez que o curso usual de movimentação da fábrica viu-se desfavorecido por situações externas e além do controlo da empresa, optou-se por adiar tais procedimentos, de modo a evitar resultados incompletos e/ou inconclusivos. Desta maneira, julgou-se por bem concluir esta etapa como sendo um planeamento para a avaliação detalhada e específica de parâmetros, devendo ser utilizada na continuidade do projecto, perante maior disponibilidade de tempo.

3.5 Simulação do escoamento

A simulação do escoamento por meio da análise computacional do fluido, representa por sua vez uma metodologia alternativa na determinação da efetividade das possíveis causas de refugos. Consistindo na modelagem do sistema e na definição das condições do escoamento, permite a análise do comportamento do vapor no interior do diafragma.

A realização desta análise se deu através do *software* de desenho SolidWorks, cuja modelagem 3D do sistema integral (tubagem, molde, pneu e diafragma) pode ser visualizada no Anexo 9, onde, diferente do dimensionamento genérico apresentado na Figura 37, os desenhos possuem dimensionamento real, baseado nos dados fornecidos pela empresa. Mais uma vez, as cotas reais serão suprimidas, em cumprimento à vontade da empresa.

As condições de escoamento estudadas representam o período inicial da Etapa 2 (vide subcapítulo 2.2.1.2) onde existe a maior pressurização do diafragma e, conseqüentemente, maior influência da pressão interna. A análise se baseia na evolução da pressão, desde o final da etapa de enformação até a sua estabilização, como delimitado na Figura 47 (baseada na Figura 7). Perante tal estabilização, o diafragma se comporta como um vaso de pressão.

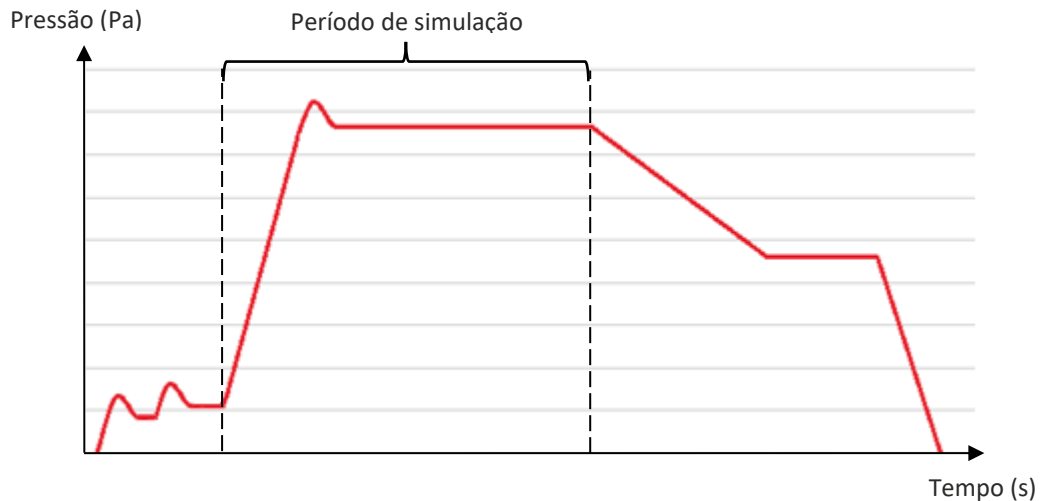


Figura 47: Período de simulação.

Os dados como a massa volúmica do fluido e o caudal fornecido na evolução da pressão foram calculados da mesma forma que no capítulo 3.1, baseando-se no funcionamento de uma válvula proporcional de KVS 2,5, completamente aberta, com uma pressão a montante igual a 1900 kPa, e a jusante variando de 45 kPa (pressão final ao estágio de enformação, após trinta ciclos) até o máximo valor de 1650 kPa. A temperatura do fluido foi considerada igual à etapa anterior.

- Massa volúmica, $\rho = 4,55 \text{ kg/m}^3$
- Caudal, $\dot{m} = 19,92 \text{ kg/s}$
- Tempo, $t = 30\text{s}$
- Temperatura, $T = 484,15 \text{ K}$

O tempo total de entrada de vapor é controlado pelo maquinário (período de facto simulado), representando a parte inclinada do gráfico; durante o restante do estudo, o diafragma comporta-se como um vaso de pressão. Tal divisão está delimitada na Figura 48.

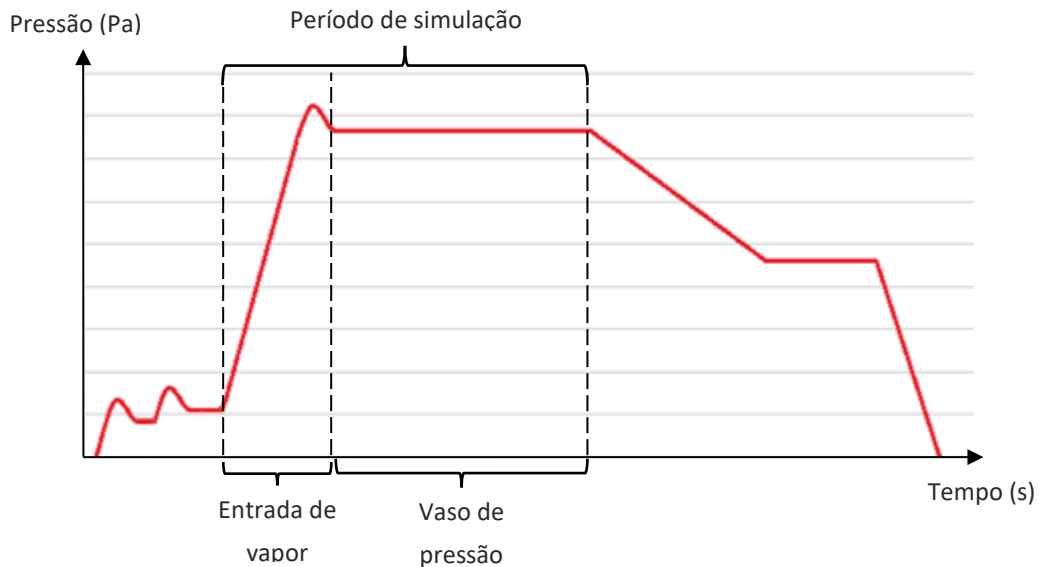


Figura 48: Etapas de análise.

As simulações realizadas permitem a visualização da evolução da pressão, da velocidade e da temperatura do vapor no interior do componente, durante o período estudado.

3.5.1 Resultados

Para uma melhor visualização das evoluções estudadas, dividiu-se o tempo total em períodos menores, uma vez que o processo ocorre de facto muito rápido. A situação correspondente ao tempo total (final da simulação) representa também a simulação do diafragma como um vaso de pressão, uma vez que tal situação se prolongará constante até o fim da etapa analisada. Os resultados obtidos estão demonstrados na sequência deste capítulo, juntamente à discussão acerca dos resultados apresentados.

3.5.1.1 Pressão

O comportamento do fluido apresentado no início da simulação, ilustrado na Figura 50 a) ($t = 0$) e logo em seguida, Figura 50 b) ($t = 2,5s$), indica uma evolução de pressão quase instantânea, partindo do valor inicial até uma pressão superior a esperada (representando o pico de pressão visto na Figura 47). Este comportamento se deve a demasiada diferença entre ambas as pressões.

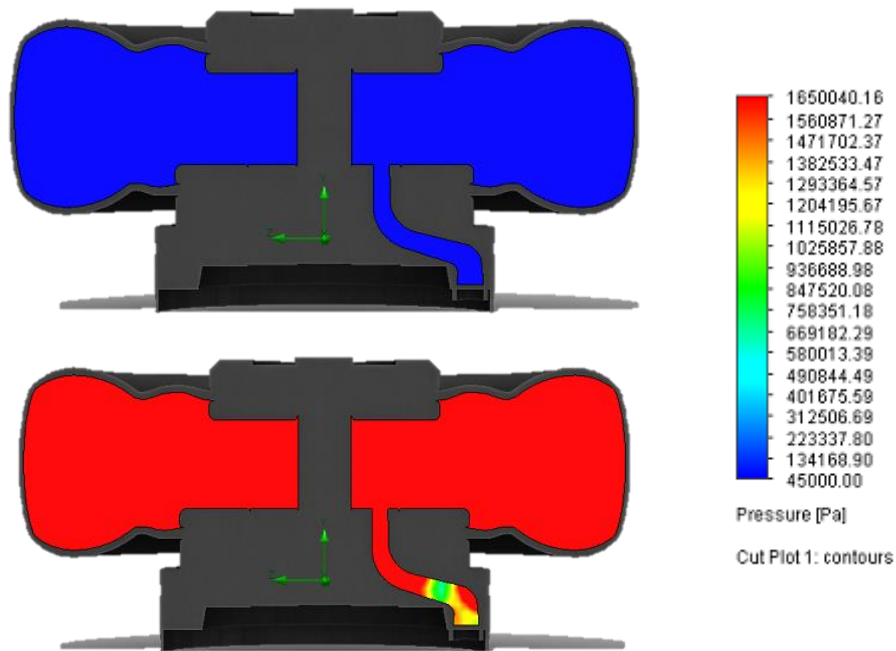


Figura 50: Pressão no interior do diafragma em a) $t = 0$ e b) $t = 2,5s$.

O comportamento do fluido apresentado logo no início da simulação indica uma evolução muito rápida da pressão interior, partindo do valor inicial de 45 kPa até uma pressão levemente superior a esperada (representando o pico de pressão visto na Figura 47). Na sequência, representa-se novamente o comportamento do fluido para o tempo igual a 3,7s (Figura 49 a) e a 10s (Figura 49 b), onde é possível visualizar a redução da pressão até um valor próximo do valor final.

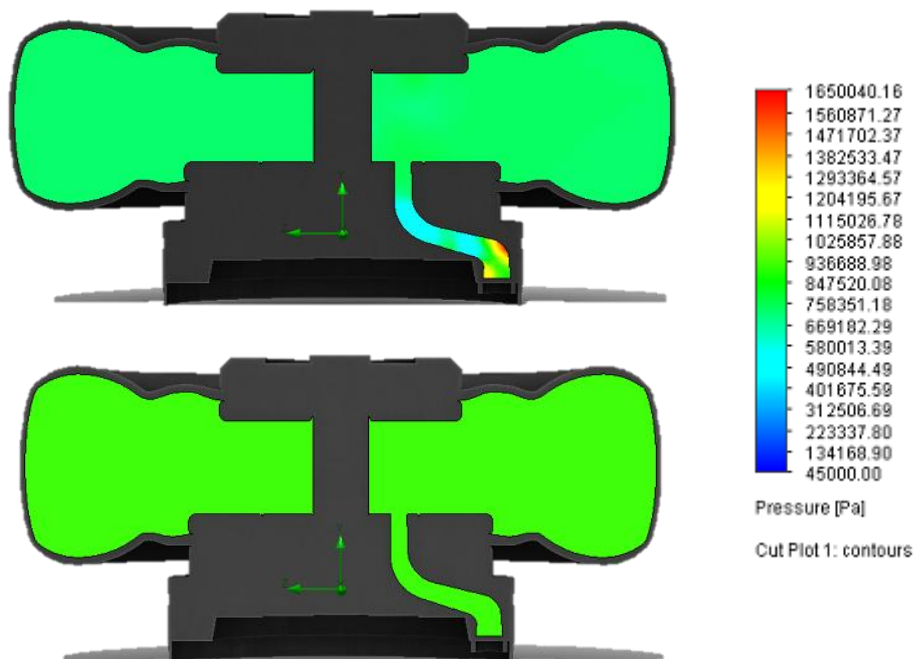


Figura 49: Pressão no interior do diafragma em a) $t = 3,7s$ e b) $t = 10s$.

Após o atingimento da condição demonstrada a partir da última imagem, todo o restante do processo representa uma evolução gradual de pressão, até o final do período de simulação ($t = 30s$).

Por via desta análise, pretendeu-se a constatação da concentração de pressão gerada na superfície do diafragma entre o seu anel e o talão do pneu. Todavia, tal concentração não foi apresentada, nem tampouco qualquer acúmulo durante o período estudado.

3.5.1.2 Temperatura

A temperatura do vapor fornecido ao diafragma, por meio do sistema de canais da fábrica, é considerada constante durante todo o processo de vulcanização, não apresentando variação nem ao atravessar a válvula proporcional, nem ao decorrer dos canais de distribuição. Assim, pode-se considerar de modo satisfatório que o vapor inflado durante o período simulado possuirá, inicialmente, o valor de 484,15 K, como demonstrado na Figura 51 a) ($t = 0$). Não obstante, quase instantaneamente, percebe-se o grande aumento de temperatura sofrido pelo fluido, devido ao aumento abrupto da pressão. Este efeito é observado na Figura 51 b) ($t = 0,05s$).

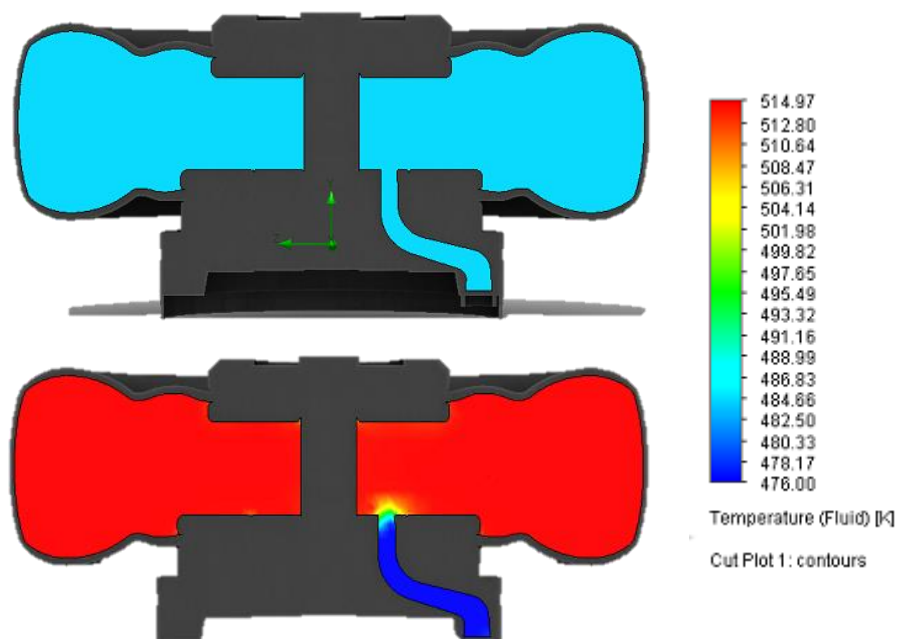


Figura 51: Temperatura no interior do diafragma em a) $t = 0$ e b) $0,05s$.

Percebe-se ainda, na sequência da simulação (Figura 52 a) para $t = 12s$), o resfriamento do vapor em contacto com os anéis superiores e inferiores, indicando a existência de perdas térmicas localizadas em tais componentes. Não obstante, a maior parte do volume de fluido se mantém sob altas temperaturas, cerca de $30^{\circ}C$ acima da temperatura fornecida. A Figura 52 b) indica a condição obtida ao final dos 30s.

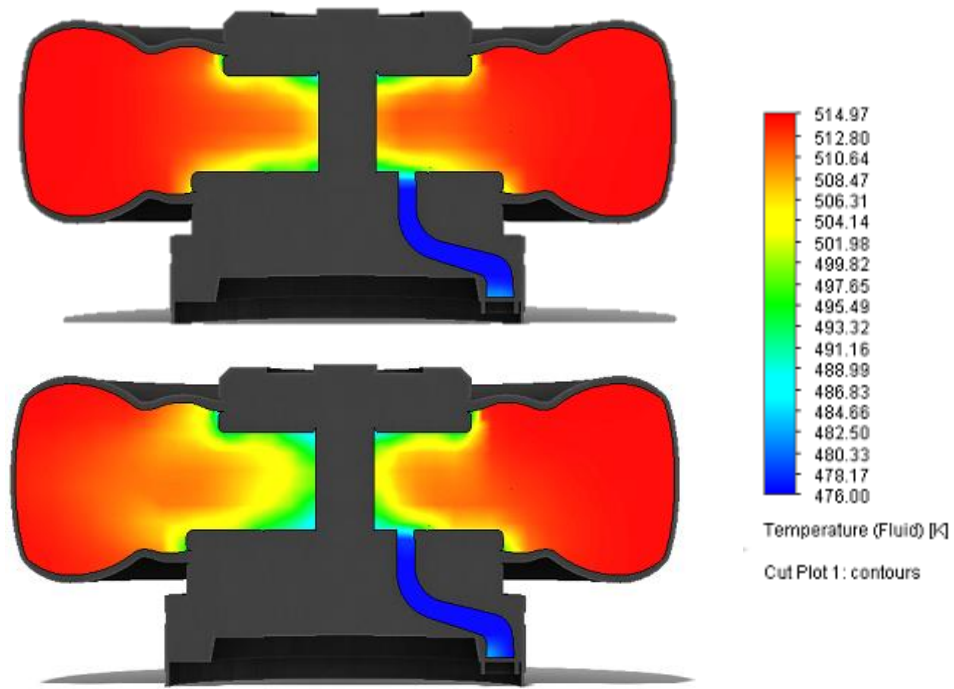


Figura 52: Temperatura no interior do diafragma em a) $t = 12s$ e b) $t = 30s$.

3.5.1.3 Velocidade

A velocidade do fluido durante a variação da pressão, partindo do valor nulo no início da simulação (sistema em equilíbrio), assume a evolução demonstrada pela sequência de imagens da Figura 53, em ordem cronológica, até o atingimento do novo equilíbrio ao final do processo.

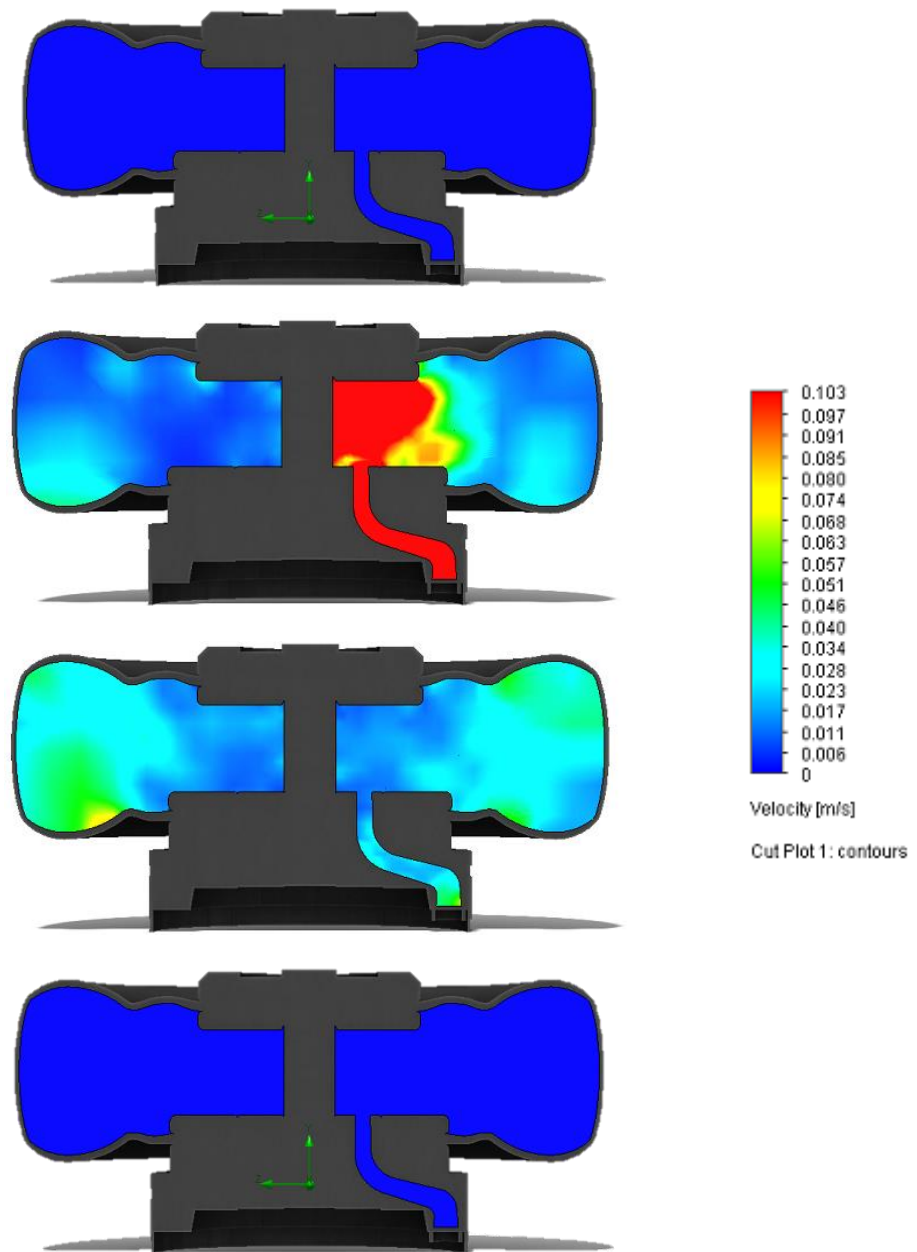


Figura 53: Velocidade do fluido no interior do diafragma em a) $t = 0$, b) $t = 0,15s$, c) $t = 6s$ e d) $30s$.

Uma outra visão das simulações geradas, tais quais demonstradas acima, pode ser associada diretamente ao componente 3D do qual faz parte, como ilustrado na Figura 54.

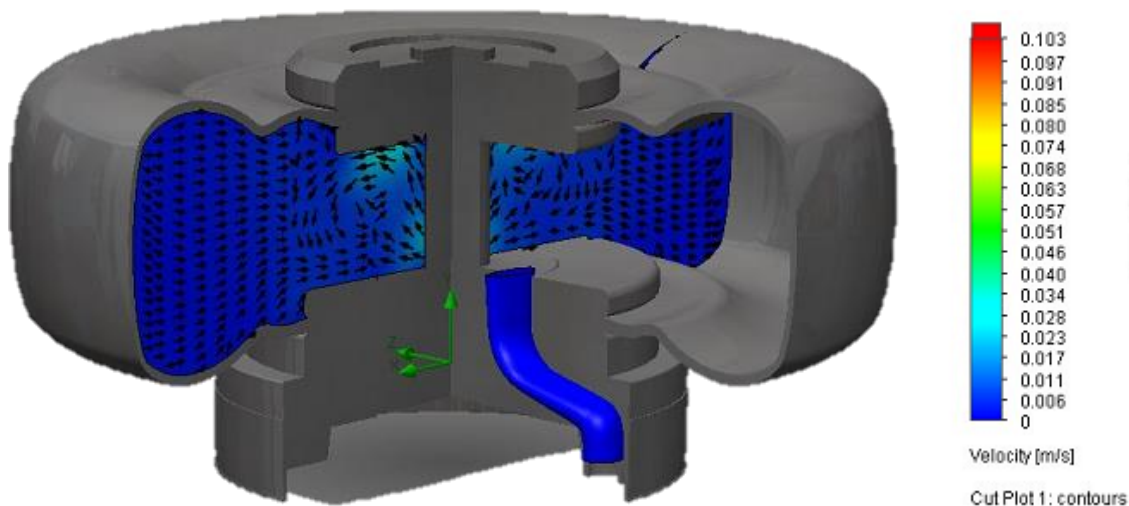


Figura 54: Simulação de velocidade, por SolidWorks.

3.6 Pressão máxima de enformação

Assim como descrito no subcapítulo 3.4.1.1, uma das possíveis causas da fragilização do diafragma caracteriza-se pela concentração de tensão entre os anéis do componente e o talão do pneu. A influência desta concentração pode ser amplificada perante um maior distanciamento entre os dois artigos, sendo este gerado pela movimentação da haste além da altura ideal para a medida vulcanizada. Além de um ajuste errôneo, as causas para tal deslocamento consistem na deformação da haste, gerando seu alongamento, perante a força sofrida pelo componente devido à pressão interna, e à cedência do cilindro hidráulico responsável pela sua movimentação.

3.6.1 Deformação da haste do diafragma

A haste do diafragma, responsável pela sustentação e ajuste do anel superior, é representada como uma barra cilíndrica, maciça e uniforme, produzida em liga de aço 34CrNiMo6. Suas dimensões configuram, para a prensa utilizada, uma área de secção transversal igual a $0,001963 \text{ m}^2$, cujas características do material podem ser encontradas integralmente no Anexo 10.

Uma vez que o vapor fornecido ao diafragma é inflado por meio de canais que atravessam o cabeçote, como demonstrado na Figura 55, o anel superior representa um obstáculo horizontal que sofrerá, efetivamente, a força gerada pela pressão contra sua superfície. Muito embora ambos os anéis possuam tal distribuição de pressão, o anel inferior, sendo fixo, não apresentará problemas quando à intensidade da força consequente, diferentemente do anel superior, sendo este o componente móvel do sistema.



Figura 55: Vista em corte do cabeçote, por SolidWorks.

A haste, por sua vez firmemente fixa ao anel superior, está propensa a sofrer a mesma força sofrida pelo anel, porém, esta força torna-se tração ao ser concentrada em sua área transversal. Assim, a tração sofrida pela haste se deve a uma consequência da pressão exercida contra a superfície do anel superior, cuja área de contacto está demonstrada em azul na Figura 56.

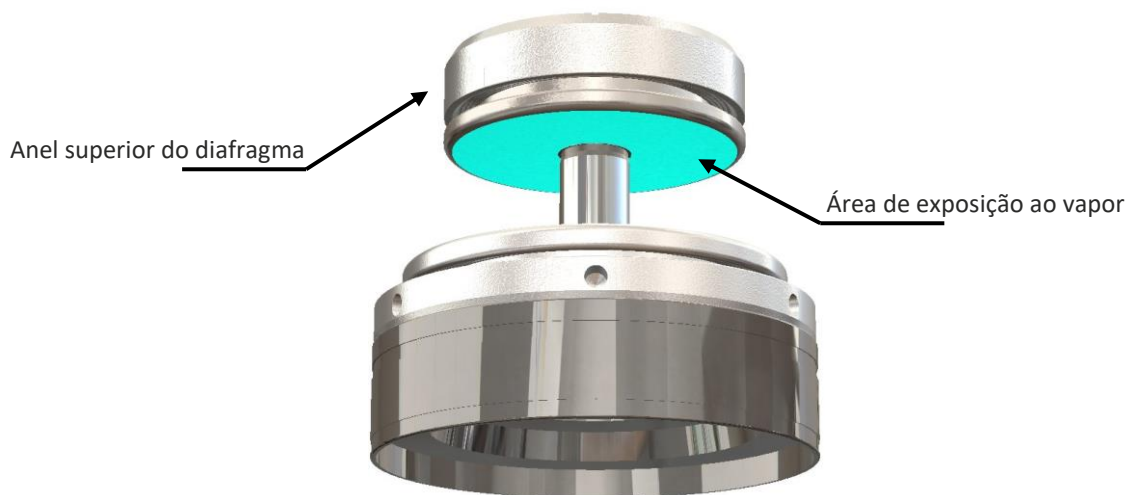


Figura 56: a) Indicação da área do anel superior exposto ao vapor, via SolidWorks

A força sofrida pelo anel pode ser calculada através da Equação 28, onde P representa a pressão interna ao diafragma (perpendicular ao anel) e A , a área do anel exposta ao vapor, perpendicular à haste, igual a $0,03021 \text{ m}^2$. Optou-se por calcular o maior esforço sofrido pela haste, através da maior pressão relativa apresentada durante o processo de vulcanização, ou seja, igual a 1650 kPa (Etapa 2, vide subcapítulo 2.2.1.2).

$$F = P \cdot A = 49,8465 \text{ kN} \quad (28)$$

Da mesma forma, calcula-se a tensão (σ) imposta à haste, através da aplicação da força calculada (F) na sua secção transversal (A) igual a $0,001963 \text{ m}^2$, de acordo com a Equação 29.

$$\sigma = \frac{F}{A} = 25,393 \text{ kPa} \quad (29)$$

Para a determinação da deformação (ϵ) do material perante tal esforço de tração (σ), aplica-se a Equação 30, a partir do Módulo de Young (E) apresentado no Anexo 10, igual a 210 GPa.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = 0,0001209 \quad (30)$$

Assim, uma vez que a tensão sofrida pelo material culmina em uma deformação consideravelmente reduzida, torna-se aceitável definir que o material não sofrerá nenhuma deformação permanente, nem tampouco qualquer deformação prezável, não necessitando assim de nenhum limite de pressão a ser aplicado em função do material da haste.

3.6.2 Cedência do cilíndrico hidráulico

O conceito de funcionamento de um cilindro hidráulico se baseia na ação de um êmbolo ou, mais especificamente, de um pistão cujo fluido de trabalho é o óleo. A movimentação do êmbolo e, em consequência, da haste acoplada a ele, dá-se por meio da variação do seu volume interno que, para o correto funcionamento do sistema, deve ser completamente preenchido pelo fluido.

Deste modo, não devem existir perdas ou acréscimos de óleo no sistema, considerando-se o volume constante durante os períodos em que a altura da haste não deve ser alterada. A partir disto, observando-se ainda a incompressibilidade apresentada pelo óleo, não podendo este ser comprimido ou expandido, define-se impossível a cedência do cilindro por parte do fluido, sendo esta atribuída, se existente, a falha dos componentes mecânicos, seja por deformação, falta de vedação ou demais influências externas. A partir da análise realizada anteriormente em relação à deformação da haste, percebendo-se o distanciamento entre os valores reais e os limites do material, pode-se determinar que não haverá qualquer cedência na movimentação da haste, por qualquer uma das partes estudadas.

CONCLUSÕES

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Proposta de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES

4.1 Conclusões

A partir das duas metodologias paralelas aplicadas no entendimento dos problemas apresentados, sendo eles a fragilização do diafragma e sua posterior falha, possibilitou-se a segregação do processo em possíveis variáveis de causa, admitindo-se diferentes graus de influência e cooperação entre parâmetros. Muito embora algumas das variáveis delimitadas dependessem diretamente da realização de testes para a determinação da sua influência efetiva sobre o comportamento do diafragma, outras poderiam ser, por sua vez, satisfatoriamente analisadas por meio do banco de dados da empresa. Ademais, de modo a elucidar todos os aspectos do funcionamento do processo, estruturou-se também a formulação matemática do escoamento de vapor, baseada no funcionamento da válvula proporcional, complementando o funcionamento físico abordado nos primeiros capítulos.

Para a demonstração dos resultados obtidos, elaborou-se a Tabela 15, onde novamente se descreve cada um dos objetivos deste trabalho e seu grau de resolução (a numeração utilizada é a mesma adotada na introdução deste trabalho).

Tabela 15: Objetivos concluídos.

Objetivo	Descrição	Conclusões	Situação final
I	Determinar as características de inflação de vapor das válvulas proporcionais, de acordo com o KVS utilizado	Determinou-se o tempo gasto na inflação do diafragma, a partir do equacionamento matemático do caudal movimentado pela válvula proporcional, representando a duração desta etapa de acordo com os parâmetros estudados	Concluído
II	Determinar o atraso de inflação de acordo com as condições de instalação, por família de prensa	A partir do equacionamento elaborado no Objetivo I, calculou-se a influência do volume total na duração da etapa de pré-enformação, de acordo com a variação do tempo perante a variação do volume inflado	Concluído

Tabela 15 (continuação): Objetivos concluídos.

Objetivo	Descrição	Conclusões	Situação final
III	Simular o escoamento de acordo com as diferentes condições de instalação	Percebeu-se, por meio da simulação do escoamento, o comportamento do vapor no interior diafragma, tal qual a variação da temperatura, da pressão e a distribuição da velocidade do fluido contra a superfície do material	Concluído
IV	Determinar as propriedades físicas dos diafragmas utilizados	Recolheram-se dados das propriedades gerais do material do qual os diafragmas são feitos	Concluído
V	Ajustar os parâmetros da receita relatada (ganho de eficiência por tempo de ciclo)	Elaborou-se o planejamento para a avaliação pormenorizada dos parâmetros envolvidos no processo, através da realização de testes práticos, visando a determinação da resposta do material a tais variáveis, permitindo futuros ajustes de receita	Planeamento concluído, proposto para trabalhos futuros

Como descrito, o último objetivo de desenvolveu como um planejamento para avaliação futura, devido a questões externas durante o período em que se desenvolveu este trabalho. Assim, embora o tempo se mostrasse escasso para a determinação dos dados, diversas análises viabilizaram a estruturação detalhada de testes objetivos a serem realizados em trabalhos futuros.

A análise centralizada ao funcionamento da válvula proporcional delimitou a economia de tempo de enchimento para válvulas com maiores KVS. No entanto, tal condição representa também uma inflação mais abrupta e, supostamente, mais agressiva ao diafragma, devendo ter sua influência quantificada por meio da realização futura de testes de propostos, observando a resposta do componente à variação dos parâmetros analisados.

Através da correlação de influência entre os factores estruturais do sistema e o tempo gasto na inflação, afirma-se que a característica mais relevante é caracterizada pelo volume a ser preenchido pelo vapor, voltando a ressaltar a necessidade de cuidado com vedações e acréscimos de volume, como em tomadas de pressão. A menor

influência, por sua vez, é representada pela existência de perdas de carga associadas aos canais de distribuição.

Em correspondência a percentagem de falha em cada posição do diafragma, percebeu-se uma considerável recorrência de furos nas extremidades (em cima e em baixo), em comparação às dobras do material, ao centro.

Os resultados obtidos, para todas as variáveis consideradas, estão descritos na Tabela 16, de acordo com cada variável considerada e a conclusão acerca de sua influência na ocorrência de furos no diafragma.

Tabela 16: Variáveis e suas influências.

Parte	Variável	Análise		Resultado
		Método	Situação	
Diafragma	Espessura vertical	Banco de dados	Concluído	Sem relevância
	Espessura horizontal	Banco de dados	Concluído	Sem variação
	Volume interno	Banco de dados	Concluído	Possível influência
	Composição da borracha	Banco de dados	Concluído	Sem variação
Prensa	Molde	Pesquisa	Concluído	Sem variação
	Composição do vapor	Pesquisa	Concluído	Sem variação
	Distribuição da fila	Pesquisa	Concluído	Possível influência
Período	Características climáticas	Pesquisa	Concluído	Sem influência
Operários	Influência humana	Pesquisa	Concluído	Não mensurável
Válvulas	Tempo de inflação	Cálculo	Concluído	Possível influência
	Tempo de inflação	Testes	Planeado	Sem dados
Utilização	Concentração de tensão	Banco de dados	Concluído	Possível influência
	Concentração de tensão	Simulação	Concluído	Sem influência
	Dobras no diafragma	Banco de dados	Concluído	Sem influência
	Pressão utilizada	Testes	Planeado	Sem dados
	Lubrificação	Testes	Planeado	Sem dados

Tabela 16 (continuação): Variáveis e suas influências.

Parte	Variável	Análise		Resultado
		Método	Situação	
Utilização	Limite de ciclos para troca	Testes	Planeado	Sem dados
	Limite de ciclos para redução da pressão de enformação	Testes	Planeado	Sem dados

Dentre as variáveis analisadas definiram-se, com base no estudo realizado anteriormente, as mais relevantes ao processo de vulcanização e, mais especificamente, ao desgaste do diafragma, sendo elas: o tempo de enchimento (inflação mais ou menos abrupta), a pressão e a lubrificação utilizadas. Destas, a pressão também acaba por culminar na variação do tempo de enchimento do componente, tal qual o volume interno do diafragma e a distribuição da fila de organização das prensas (devido a perda de carga a montante da válvula). Não obstante, embora comprovada a variação do tempo de enchimento perante tais variáveis, não foi possível determinar sua influência na ocorrência de refugos, uma vez isso só poderia ser analisado por meio de testes de variação de pressão (novamente, estando as variáveis interligadas).

Deve-se considerar, também, que a influência da concentração de pressão foi indicada pela análise da posição dos furos, apresentando considerável relevância nas extremidades do diafragma. Entretanto, as simulações geradas não apresentaram nenhuma comprovação que tal fenômeno de facto ocorra.

Todas as análises realizadas representam avanços no estudo do processo de vulcanização e seus parâmetros específicos pois, mesmo que não demonstrada influência, tais questões foram estudadas, pesquisadas e elucidadas, levantando suas características e possíveis relevâncias.

Ademais, em âmbito pessoal, o presente trabalho proporcionou não somente a compreensão do processo físico envolvido, do funcionamento do maquinário e seus parâmetros, mas também possibilitou a experiência e o desafio gerados pela transposição da zona de conforto usual. Por meio da instigação gerada pela pesquisa, possibilitou-se o desenvolvimento de novas técnicas de estudo e o aprimoramento dos métodos de análise, permitindo a ramificação do problema em soluções dinâmicas. Aperfeiçoaram-se também características profissionais essenciais, como flexibilidade, perseverança e determinação, culminando no desenvolvimento pessoal de conhecimentos.

4.2 Proposta de trabalhos futuros

O planejamento estruturado para a justificativa, orientação e realização de testes futuros, tendo por base as variáveis apresentadas, representa o estudo capaz de determinar a influência dos parâmetros abordados de acordo com a fragilização do material, devendo este ser realizado na sequência desta pesquisa.

A partir dos dados considerados, propõe-se o estudo específico de cada variável em sua integridade, levantando-se características próprias de funcionamento e otimização. Entretanto, evidencia-se prioritariamente, além da realização e análise dos testes propostos, o estudo centralizado do material dos diafragmas, considerando suas características físicas e químicas, bem como a sua resposta às condições de fricção e expansão e às diferentes pressões e temperaturas utilizadas. Deve-se, também, estudar a prensa de vulcanização, juntamente a cada um dos seus parâmetros de funcionamento, delimitando possíveis falhas ou condições mecânicas mal otimizadas da máquina.

BIBLIOGRAFIA

5 BIBLIOGRAFIA

Afinko (2018) *Borracha com rachaduras*. Available at: <https://afinkopolimeros.com.br/borracha-com-rachaduras/> (Accessed: 9 March 2020).

Almeida, C. F. M. (2018) 'Válvulas de Controle'.

Bhowmick, H. A., Hall, A. K., Benarey, M. M. (1994) *Rubber Products Manufacturing Technology*. Kharagpur, India: CRC Press.

Big Tires (2020) *Como é feito um pneu*. Available at: <https://www.bigtires.com.br/como-é-feito-um-pneu> (Accessed: 27 February 2020).

Caetano, M. (2010a) *Borracha Butílica: Poliisobutileno Isopreno*. Available at: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/materias-primas/borrachas/borrachas-sinteticas/borracha-butilica-poliisobutileno-isopreno-iir/> (Accessed: 24 November 2019).

Caetano, M. (2010b) *Vulcanização de Pneus | Ciência e Tecnologia da Borracha*. Available at: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/pneus/o-fabrico-de-pneus/vulcanizacao-de-pneus/> (Accessed: 10 November 2019).

Caetano, M. (2010c) *Vulcanização em Prensa de Compressão. Ciência e Tecnologia Borracha*. Available at: <https://www.ctborracha.com/processos/vulcanizacao/prensa-de-compressao/> (Accessed: 10 November 2019).

Callister, W. D. and Rethwisch, D. G. (2016) *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 9th edn. LTC.

Carvalho, J. A. A. R. (2012) *Isolamento térmico de prensas de vulcanização de pneus*. Instituto Politécnico de Bragança.

Continental (2020) *Continental - sobre nós*.

Continental AG (2015) *Press kit Continental TechnikForum*. Available at: <http://www.deshors-tiremold.com/fr/products/tire-mold/> (Accessed: 19 November 2019).

Continental AG (2017) 'Technical Databook 2017 · 2018'. Available at: <https://www.continental-tires.com/car/media-services/downloads>.

Costa, H. M., Visconde, L. L. Y., Nunes, R. C. R., (2003) 'Aspectos históricos da vulcanização', *Polímeros*, 13(2), pp. 125–129.

Cowinns (2017) *6" 150LB Zirconium dual plate wafer check valve*. Available at: <https://www.cowinns.com/products/6-150LB-Zirconium-dual-plate-wafer-check-valve.html> (Accessed: 11 December 2019).

FBV INC. (no date) *FBV Globe Valve*. Available at:

<http://comercialcitycon.com.br/valvula-globo.html> (Accessed: 6 December 2019).

Gomes, C. C. (2018) 'Processo de aquecimento de moldes'.

Gonçalves, A. (2012) *Análise e melhoria de processo de pintura e vulcanização na Continental*.

JEFFERSON (2019) *Válvula de Retenção Portinhola*. Available at: <https://www.jefferson.ind.br/conteudo/valvula-de-retencao-portinhola-.html> (Accessed: 11 December 2019).

Moulage, D. (2016) *Tire Mold*. Available at: <http://www.deshors-tiremold.com/fr/products/tire-mold/> (Accessed: 19 November 2019).

OVAKO (2017) 'Steel grade', pp. 6–8. Available at: <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/18crnimo7-6/?acceptCookies=true>.

Pereira, M. dos A. (2011) *Utilização de pneus inservíveis em pavimento asfáltico*. São Paulo.

Pinheiro, E. G. (2001) *Modelos numéricos aplicados à Vulcanização de Pneus*.

SAMSON (1996) 'Posicionador Electro-Pneumático Tipo 3767'.

SAMSON (2012) 'Examination Report on Seats and Plugs of Types 3241 Valves'.

SAMSON (2018) 'Data Sheet T 8015 EN', (April), pp. 1–8.

SAMSON (2019) *Globe Valves*. Available at: <https://www.samsoncontrols.com/product/3351-onoff-globe-valve> (Accessed: 10 December 2019).

Shreve, R. N., Brink Jr., J. A. (1977) *Indústrias da Borracha, Indústria de Processos Químicos*. Edited by Horáco Macedo. Editora Guanabara.

Silva, G. V. M. da (2004) *Instrumentação industrial*. 2^a.

Silva, N. M. M. (2016) 'Estudo e otimização do processo de vulcanização numa indústria de pneus'.

Silveira, C. B. (2016) *Como Funciona a Válvula de Retenção*. Available at: citisystems.com.br/valvula-de-retencao/ (Accessed: 11 December 2019).

Solution Controles (2018) *Produtos: Válvula ON-OFF*. Available at: <http://solutioncontroles.com.br/produtos/valvulas-on-off/> (Accessed: 4 December 2019).

Tauform (2010) *Tyre Curing Containers*. Available at: <http://www.tauform.hu/en-product-curing-containers.php> (Accessed: 19 November 2019).

Uniroyal (2020) *Componentes de um pneu*. Available at: <https://www.uniroyal.pt/ligeiros/guia-de-pneus/guia-de-pneus/componentes-de-um-pneu> (Accessed: 27 February 2020).

ANEXOS

- 6.1 Anexo 1 – Componentes básicos de um pneu
- 6.2 Anexo 2 – Classificação das válvulas de controlo
- 6.3 Anexo 3 – Características dimensionais dos diafragmas
- 6.4 Anexo 4 – Propriedades dos diafragmas

6 ANEXOS

6.1 Anexo 1 – Componentes básicos de um pneu

A estrutura fundamental dos pneus produzidos pela Continental Mabor segue o ilustrado na Figura 57, tendo seus componentes identificados por números de 1 a 9, tais quais descritos na sequência (Uniroyal, 2020).



Figura 57: Componentes de um pneu (Uniroyal, 2020).

1. **Piso, relevo e ombro:** o piso é representado pela parte macia do pneu, que estará em contato com o solo, responsável pelo amortecimento e pela aderência à estrada; o seu relevo provê ao pneu estabilidade direcional e resistência. O ombro é a área de união entre o piso e a parede lateral do pneu (flanco), devendo ser otimizada para o desempenho em curvas;
2. **Malha de relevo, sem junta:** composta por fibras sintéticas entrançadas em borracha, permite a flexibilidade do pneu e a adaptação a altas velocidades;
3. **Malhas de cintura:** compostas por fios de aço, aumentam a resistência do pneu e sua durabilidade. Também auxilia na estabilidade direcional;
4. **Malha têxtil:** é responsável pelo controle da pressão interna e pela conservação do formato do pneu. É estruturada com poliéster ou raion;
5. **Revestimento interno:** composto por borracha, reveste o interior do pneu e veda a câmara-de-ar;
6. **Parede lateral ou flanco:** além de conter, gravadas em sua superfície, todas as informações úteis sobre o pneu, também provê sua estabilidade lateral e proteção aos componentes internos;

7. **Reforço do talão:** Provê precisão à condução e aumenta a estabilidade direcional. É composto por fibras sintéticas e de aramida;
8. **Vértice do talão:** além de possuir as mesmas vantagens do reforço de cordão, também amplifica o conforto gerado. É composto por borracha sintética;
9. **Núcleo do talão:** trata-se de um cabo de aço revestido em borracha, responsável por garantir a aderência e a estabilidade do pneu sobre a jante do automóvel.

6.2 Anexo 2 – Classificação das válvulas de controlo

As válvulas podem ser produzidas, essencialmente, sob uma ampla gama de dimensões e com diferentes componentes internos. A Figura 58 representa um esquema elementar da correlação entre as características das válvulas e suas categorias.

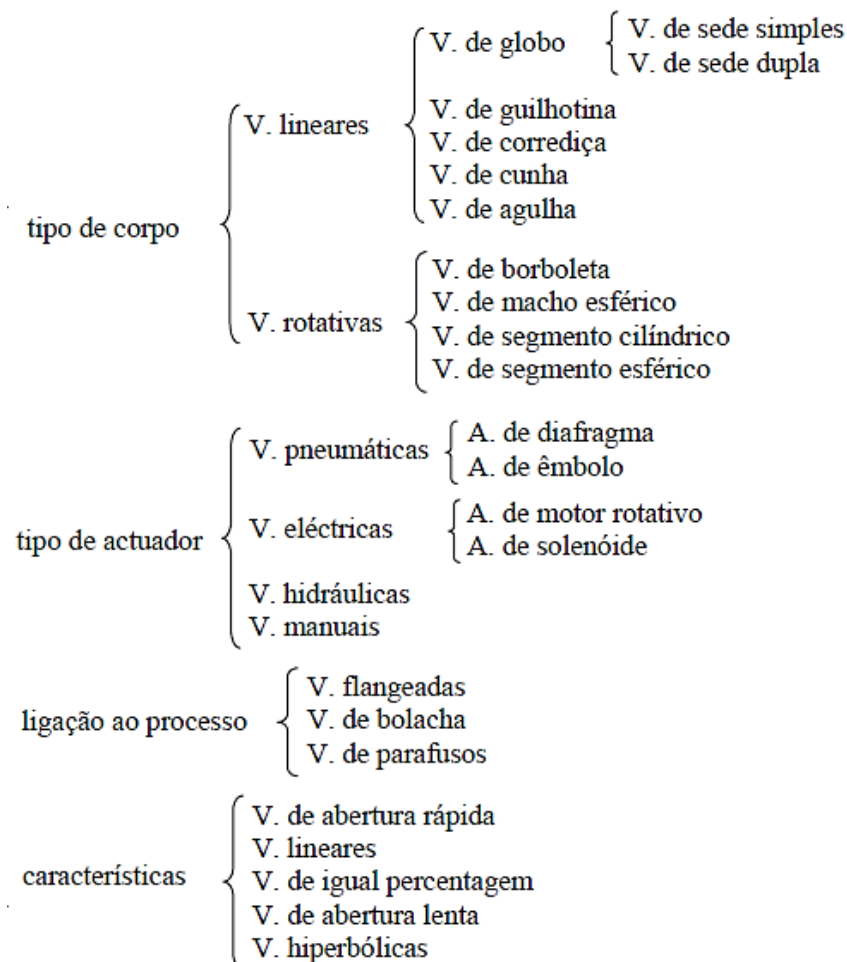


Figura 58: Classificação das válvulas de controlo (Silva, 2004).

Uma válvula linear, ou de haste deslizante, possui movimentação ascendente e descendente, enquanto uma válvula rotativa movimenta sua haste através de rotação. As válvulas utilizadas na tubulação interna das prensas de vulcanização possuem atuação pneumática, sendo do tipo globo (tipo de válvula representada na Figura 25).

6.3 Anexo 3 – Características dimensionais dos diafragmas

A texturização da superfície dos diafragmas garante o escape do ar entre o componente e o pneu. De acordo com o *Technical Databook*, as texturas utilizadas correspondem às superfícies 1, 2 e 3 (Figura 59), sendo elas denominadas, respectivamente, como *Advanced pebbles* e *Standard pebbles*.

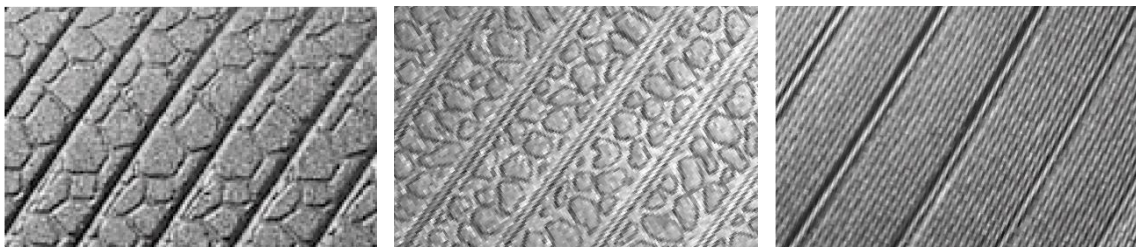


Figura 59: Superfícies 1 (esquerda), 2 (centro) e 5 (esquerda) (Continental, 2017).

Seguindo o padrão ilustrado na Figura 60, os diafragmas utilizados possuem as dimensões demonstradas na Tabela 17.

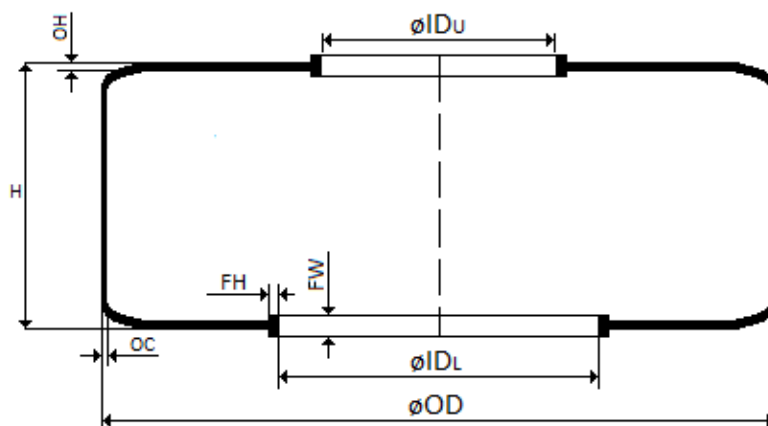


Figura 60: Dimensões de um diafragma (Continental, 2017).

Tabela 17: Dimensões dos diafragmas (Continental, 2017).

Diafragma	H mm	OD mm	DL mm	DU mm	FH mm	OC mm	OH mm	FW mm	Superfície
A	274	460	170	225	12	4,5	7	24	1
B	270	490	170	225	12	4,5	7	24	2
C	306	506	170	225	12	4,5	7	24	1
D	369	600	225	276	12	4,5	7	24	2
E	285	500	170	225	12	4,5	7	24	1
F	316	520	170	225	12	4,5	7	24	1
G	311	660	225	276	12	4,5	7	24	1
H	381	660	225	276	12	4,5	7	24	1

Tabela 17 (continuação): Dimensões dos diafragmas (Continental, 2017).

Diafragma	H mm	OD mm	DL mm	DU mm	FH mm	OC mm	OH mm	FW mm	Superfície
I	263	520	170	225	12	4,5	7	24	1
J	244	550	225	276	12	4,3	7	24	1
K	265	550	225	276	12	4,3	7	24	1
L	263	570	225	276	12	4,5	7	24	1
M	323	570	225	276	12	4,3	7	24	1
N	279	600	225	276	12	4,3	7	24	1
O	303	600	225	276	12	4,3	7	24	1

6.4 Anexo 4 – Propriedades dos diafragmas

De acordo com a norma ASTM D2000, o material do qual são feitos os diafragmas, a borracha butílica, possui a classificação do tipo A e B, classe A; suas propriedades estão listadas na Tabela 18.

Tabela 18: Propriedades típicas da Borracha Butílica (adaptado de Caetano, 2010).

Propriedade	Valores típicos
Alongamento na rotura [%]	800
Deformação residual [%]	20 – 50
Massa volúmica do polímero [kg/m ³]	0,92
Dureza Shore A [A]	30 – 90
Impermeabilidade aos gases	Excelente
Resistência à abrasão	Excelente
Resistência à água	Boa
Resistência a ácidos e bases concentrados	Boa
Resistência a ácidos e bases diluídas	Boa
Resistência à intempérie, luz solar e UV	Boa
Resistência ao impacto	Excelente
Resistência a óleos e gasolinas	Muito fraca
Resistência ao ozono	Boa
Resistência ao rasgo	Boa
Resistência a solventes alifáticos	Muito fraca
Resistência a solventes aromáticos	Muito fraca
Resistência elétrica (Ω/cm^2)	1015 – 1016
Temperatura máxima de serviço (° C)	120
Temperatura máxima por períodos curtos (° C)	140
Temperatura mínima de serviço (° C)	- 45
Tensão de rotura [MPa]	7 – 17

6.5 Anexo 5 – Determinação da pressão atmosférica local

De acordo com a Tabela 19, a pressão atmosférica para a localidade de Lousado, onde se localiza a fábrica e cuja altitude é igual a 80 m, equivale a 100,3868 kPa. Tal valor é obtido pela interpolação demonstrada na Equação 31, cujos valores utilizados estão indicados tanto na tabela quando no cálculo subsequente.

Tabela 19: Pressões atmosféricas em diferentes altitudes (adaptada de ASHRAE, 2009).

Altitude (m)	Pressão atmosférica (kPa)
-500	107,478
0	101,325
500	95,461
1000	89,875
1500	84,556
2000	79,495
2500	74,682
3000	70,108
4000	61,640
5000	54,020
6000	47,181
7000	41,061
8000	35,600
9000	30,742
10000	26,436

$$x = 101,325 + \frac{95,461 - 101,325}{500 - 0} \cdot (80 - 0) = 100,3868 \text{ kPa} \quad (31)$$

6.6 Anexo 6 – Resolução numérica da equação de inflação da válvula proporcional

A Equação 19, tal qual demonstrada novamente abaixo, representa um cálculo implícito, necessitando de tratamento computacional para sua resolução.

$$M(t) = \int_0^t \rho \cdot kv \cdot \sqrt{P_{mon} - \frac{M(t) \cdot Rv \cdot T}{V}} \cdot dt + \frac{Pi \cdot V}{Rv \cdot T} \quad (19)$$

Tal resolução baseia-se em dois métodos distintos, de modo de averiguar a fidedignidade dos valores obtidos. O primeiro destes estrutura-se na escrita de um programa computacional na linguagem do *software* Octave, cujo modelo pode ser visualizado por meio da Figura 61, onde os valores são substituídos por “xxx”, uma vez que este deve ser apenas o modelo e não um programa específico.

```

1  clc; clear;
2
3  filename = 'Inflacao.csv'
4
5  maxIteracoes = 10;
6  ultimoM = 0;
7
8  M_log = [];
9
10 tmáx = 5;
11 dens = xxx;
12 Kv = xxx;
13 Pmon = 419.3868;
14 Pi = 60,3868;
15 Rv = 0.00046152;
16 T = 484.15;
17 V = 0.0102022;
18 dt = xxx;
19 Mo = Pi*V/(Rv*T);
20 ultimoM = Mo;
21
22 for t = 0:dt:tmáx
23
24     i=0;
25     while(1)
26         M = dens*Kv*t*sqrt(Pm-(Rv*T/V)*ultimoM)+Mo;
27         ultimoM = M;
28
29         if(i > maxIteracoes)
30             M_log = [M_log ultimoM];
31             break;
32         else
33             i = i+1;
34         end
35     end
36
37 end
38
39 t = (M_log - Mo)./(dens*Kv.*sqrt(Pmon-(Rv*T/V).*M_log));
40
41 dlmwrite(filename,[t' M_log'],';');
42
43 plot(t, M_log, "color", "red", "linewidth", 3);
44 title("P > 30", "fontsize", 30);
45 xlabel("Tempo", "fontsize", 30);
46 ylabel("Massa", "fontsize", 30);
47
48 grid minor;
49
50 axis([0 tf])

```

Figura 61: Modelo do programa utilizado no *software* Octave.

No modelo apresentado, $t_{\text{máx}}$ representa o limite de tempo a ser analisado pelo teste, em segundos, de modo que este não se estenda muito além do necessário após o atingimento da massa final. As demais variáveis cujos valores estão indicados configuram-se como constantes, sendo iguais para todos os diafragmas. Os demais pormenores do programa dizem respeito à linguagem de programação e aos ajustes necessários, incluindo a geração do gráfico de resultados.

A variável dt indica tamanho do período a ser analisado a cada iteração, relacionado com a exatidão dos resultados; para a escolha deste valor, testaram-se períodos de 0,1s a 0,00001s e, uma vez que os respectivos resultados não apresentaram relevante variação, considerou-se suficiente uma exatidão de quatro dígitos ($dt = 0,0001s$).

O gráfico gerado para este problema, a partir do Octave, pode ser observado na Figura 62, onde o “tempo total” é considerado igual ao tempo gasto no atingimento da “massa final” (6,18 kg), indicada na figura. Este gráfico representa a inflação do diafragma A, através de uma válvula de KVS 2,5 (abertura de 80%) e para um número de ciclos inferior à 30.

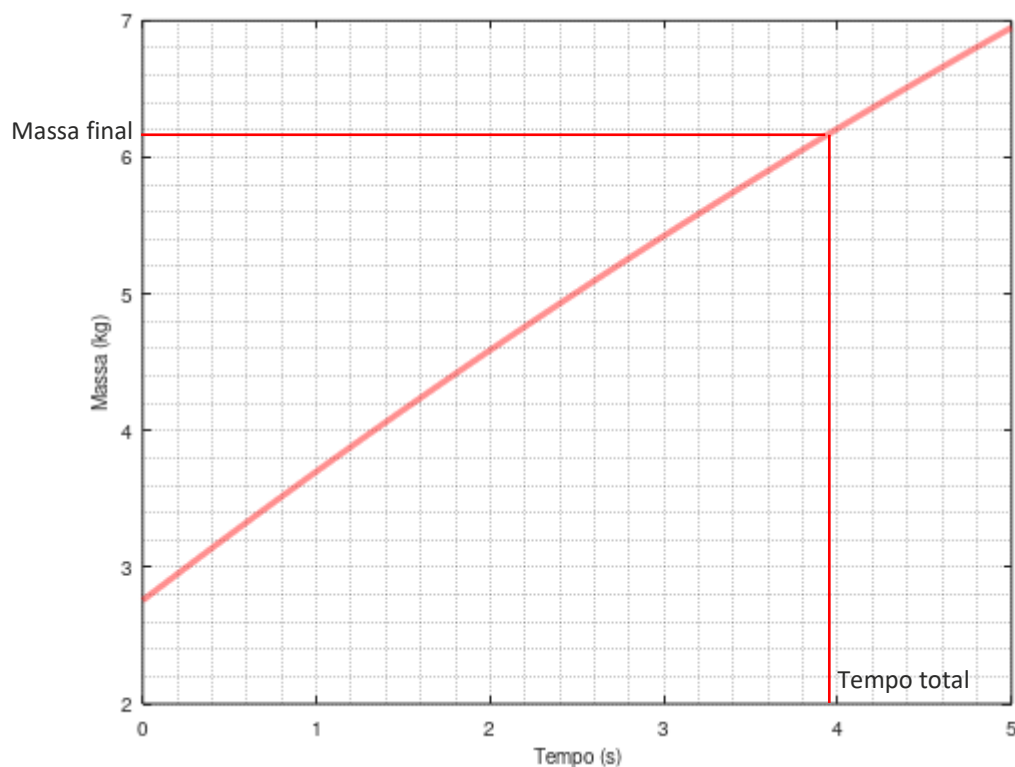


Figura 62: Evolução da massa interna de vapor em função do tempo, por Octave.

Desta forma, a curva gerada representa a evolução da massa do vapor dentro do diafragma com o passar do tempo. No entanto, deve-se atentar ao facto de que esta “curva”, propriamente dita, demonstra uma evolução não retilínea. Este comportamento não-linear se deve à compressibilidade do vapor que, muito embora possa ser considerado um gás ideal nestas condições, ainda pode ser comprimido.

O segundo método de análise baseou-se na utilização de uma planilha de cálculo do Excel, onde se atribuiu a cada uma das variáveis uma célula específica a partir das quais montou-se a equação final. Após, representou-se a variável tempo, t , por uma sequência crescente, cujo acréscimo é dado pelo mesmo dt explicado anteriormente.

Desde modo, a cada acréscimo de tempo, a célula responsável pelo cálculo da massa (dependente de t) apresenta um valor atualizado, sequencialmente até o atingimento da massa final, como demonstrado na Figura 63, a partir da qual se define o tempo total do processo. Na figura, estão demonstrados os resultados para uma válvula KVS 2,5 e diafragmas cujo tempo de vida seja inferior aos trinta ciclos; o dt utilizado, para este exemplo, foi de 0,01s, tencionando facilitar a visualização (muito embora as análises realizadas tenham utilizado um dt igual a 0,0001s). Novamente, o diafragma analisado é o diafragma A, cuja abertura da válvula é igual a 80%.

dt = 0,01	
t (s)	M (Kg)
0	2,757159
0,01	2,766876
0,02	2,776587
0,03	2,786292
0,04	2,795992
0,05	2,805686
0,06	2,815374
0,07	2,825056
0,08	2,834733
0,09	2,844403
0,1	2,854068
...	
3,9	6,134788
3,91	6,142452
3,92	6,15011
3,93	6,157764
3,94	6,165413
3,95	6,173058
3,96	6,180697

$t + dt$ → (pointing to the first row)
 Massa inicial, M_0 → (pointing to the first row)
 Tempo total → (pointing to the last row)
 Massa final, M_f → (pointing to the last row)

Figura 63: Células de resolução, por Excel.

O gráfico gerado por esta sequência de resultados está ilustrado na Figura 64, a partir do qual se constata a evidente semelhança com a resolução via Octave (Figura 62), representando o mesmo comportamento da curva de evolução da massa interna. Novamente, estão indicadas na figura a massa final e o tempo total de processo.

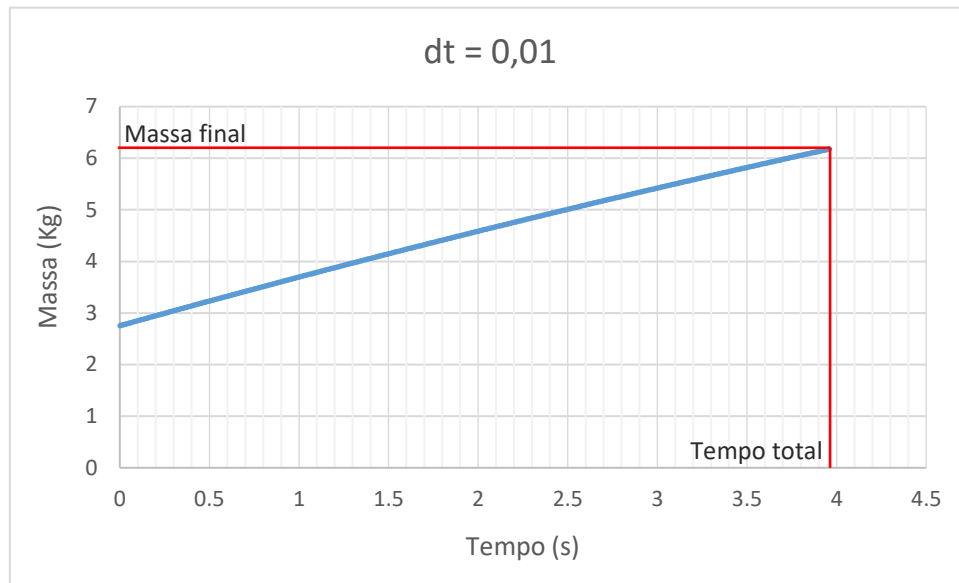


Figura 64: Evolução da massa interna de vapor em função do tempo, por Excel.

6.7 Anexo 7 – Distribuição de prensas na fábrica

A distribuição de prensas, no interior da fábrica da Continental Mabor dá-se por filas, organizadas de A a T, onde a cada cavidade é atribuído um número sequencial (mesmo que duas cavidades pertençam à mesma prensa, ambas serão catalogadas com valores individuais), tal qual demonstrada na Figura 65.

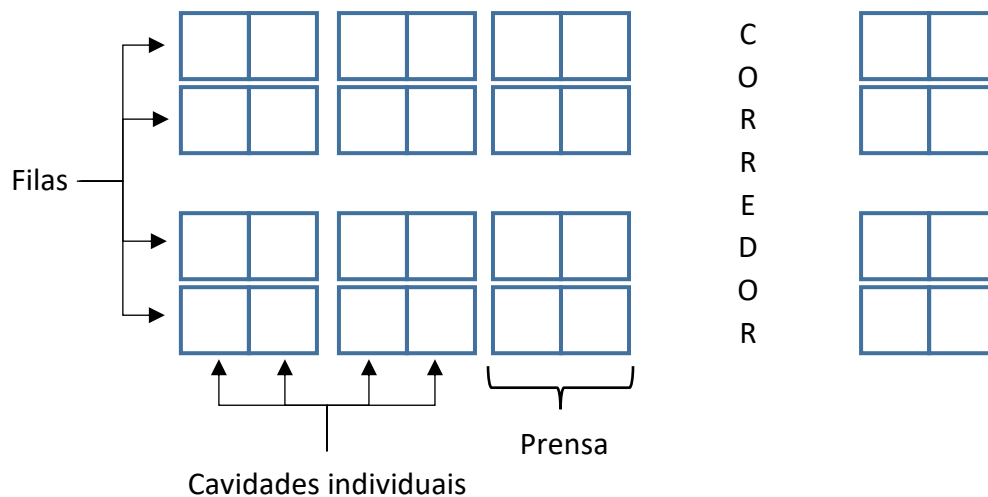


Figura 65: Distribuição de prensas na fábrica, por ordem de fila.

Não obstante, as prensas também podem ser organizadas de acordo os canais de distribuição de vapor, que devem suprir todas as prensas da fábrica simultaneamente. Cada canal, organizado de 1 a 10, fornece vapor a duas filas, sendo

também dividido em “A” e “B”, correspondendo ao lado do corredor no qual se encontra (Figura 66).

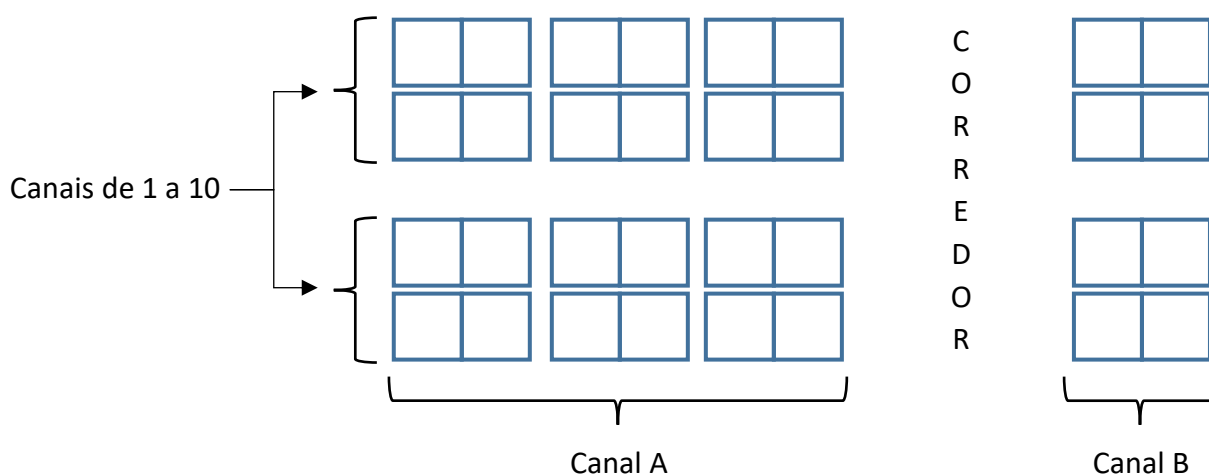


Figura 66: Distribuição de prensas na fábrica, por ordem de canal.

6.8 Anexo 8 – Receitas de pressão para as etapas iniciais da vulcanização

Listadas na Tabela 20 estão as pressões comumente utilizadas para cada diferente diafragma, durante a etapa de pré-enformação. Deve-se considerar que a pressão de enformação, sendo a etapa subsequente à descrita na tabela, acompanha os valores expressos de forma proporcional, com um acréscimo de, geralmente, 20 kPa.

Tabela 20: Receita de pressão dos diafragmas para a etapa de pré-enformação.

Diafragma Utilizados	Pressão de pré-enformação (kPa)	
	Ciclo < 30	Ciclo > 30
A	35	25
B	35	25
C	35	25
D	40	30
E	35	25
F	45	35
G	45	35
H	35	25
I	35	25
J	45	35
K	45	35
L	45	35

Tabela 20 (continuação): Receita de pressão dos diafragmas para a etapa de pré-enformação.

Diafragma Utilizados	Pressão de pré-enformação (kPa)	
	Ciclo < 30	Ciclo > 30
M	40	30
N	40	30
O	45	35

6.9 Anexo 9 – Desenho mecânico dos sistemas

A partir dos desenhos mecânicos de cada uma das peças do sistema, isoladamente, modelou-se todo o conjunto estudado, representando o maquinário envolvido no processo de vulcanização. A modelagem 3D do conjunto de tubos e válvulas, ilustrado anteriormente na Figura 18, pode ser visualizado na Figura 67 (em vista superior) e na Figura 68 (em vista isométrica).

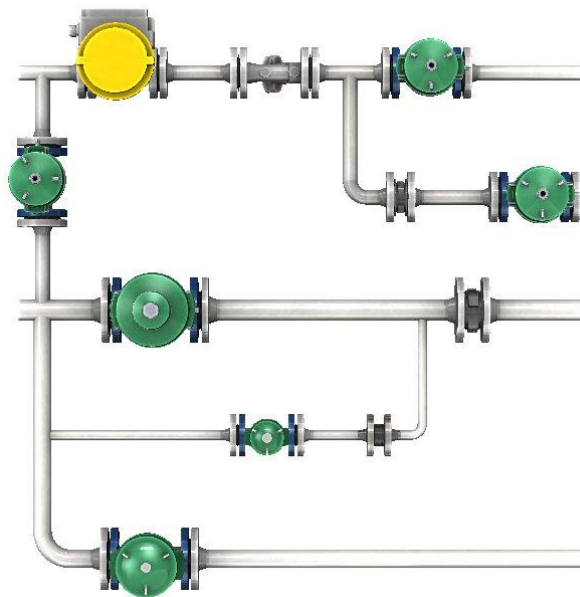


Figura 67: Tubulação de uma pensa de pneus, em vista superior.

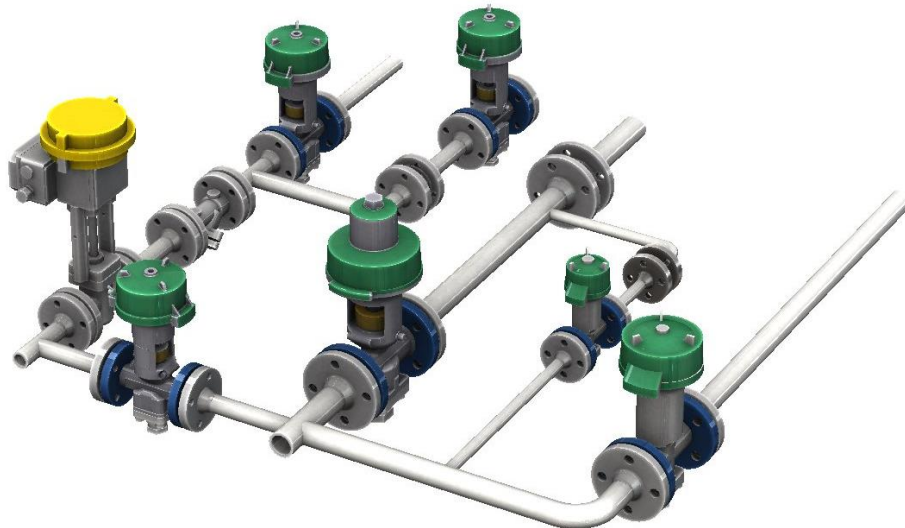


Figura 68: Tubulação de uma prensa de pneus, em vista isométrica.

A tubulação da prensa se conecta com o molde por meio de duas mangueiras, pelas quais é transportado o vapor. Tal conjunto é demonstrado na Figura 69 (vista superior) e na Figura 70 (vista isométrica), desenhado através do SolidWorks.

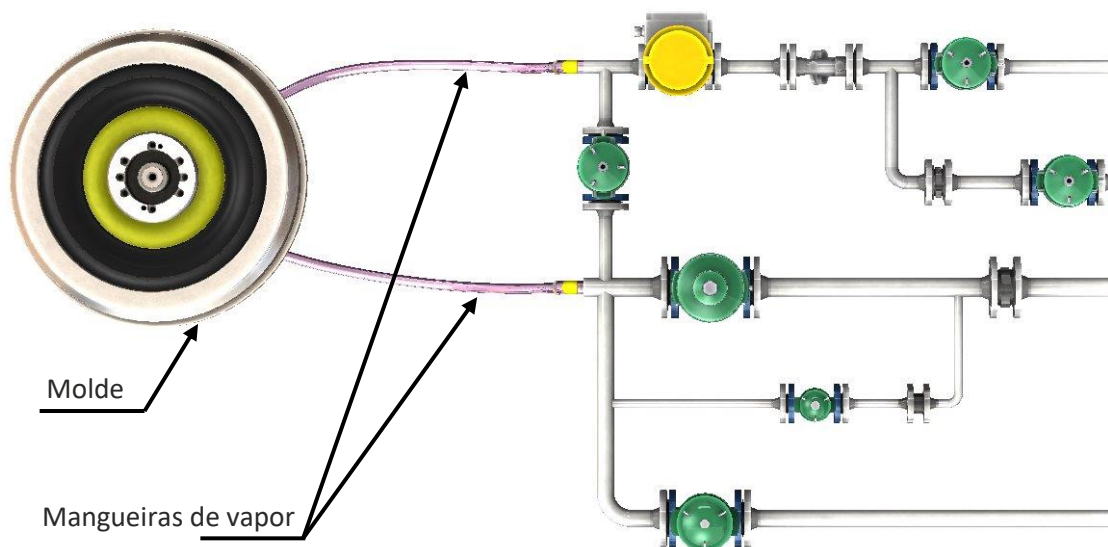


Figura 69: Conjunto de tubulação e molde, em vista superior.

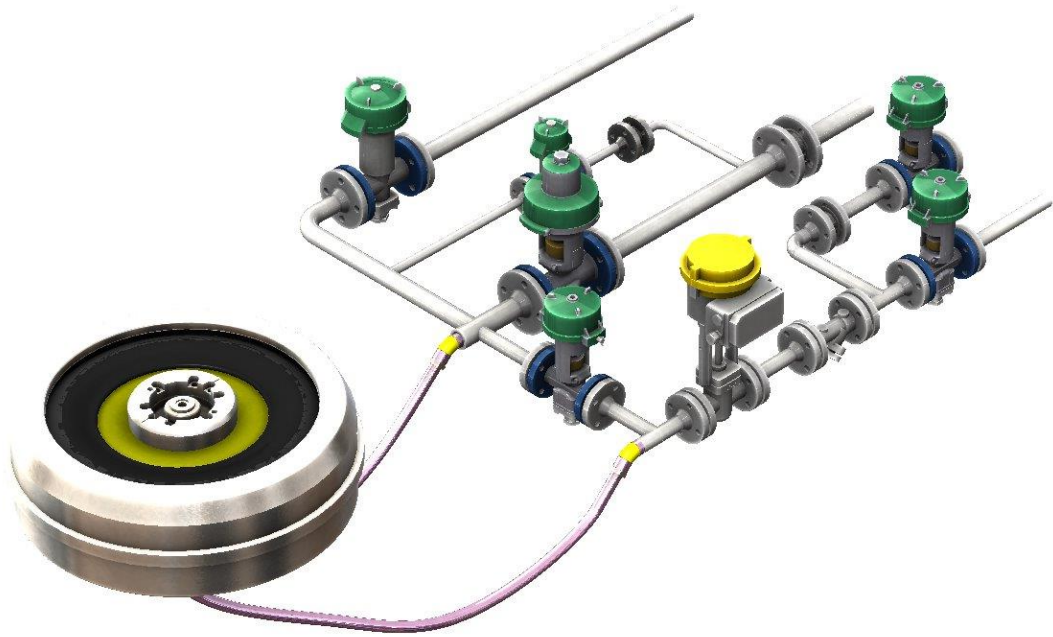


Figura 70: Conjunto de tubulação e molde, em vista isométrica.

O conjunto do molde, por sua vez, composto por molde, pneu, diafragma e componentes internos, pode ser visualizado em corte na Figura 71 (vista isométrica) e na Figura 72 (vista frontal, com indicação de componentes).

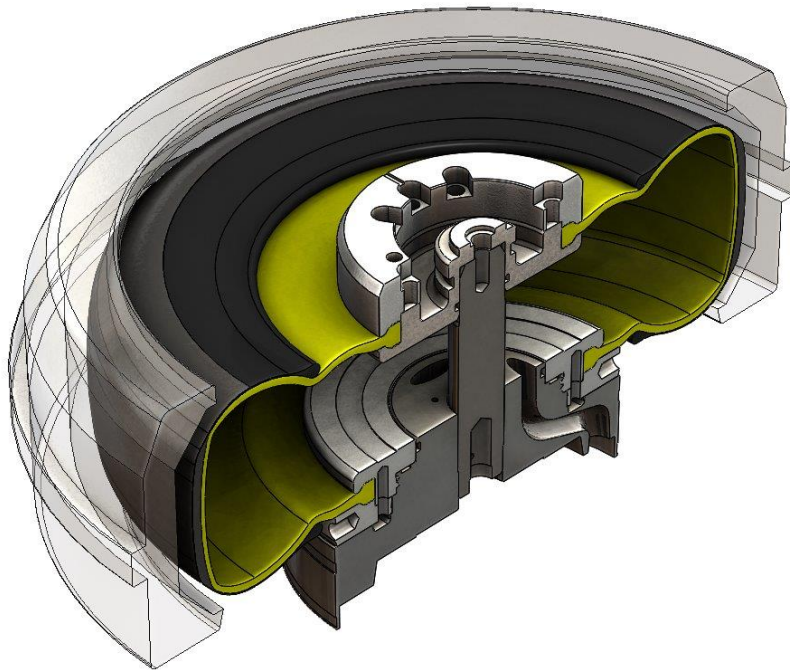


Figura 71: Conjunto do molde, vista isométrica em corte.

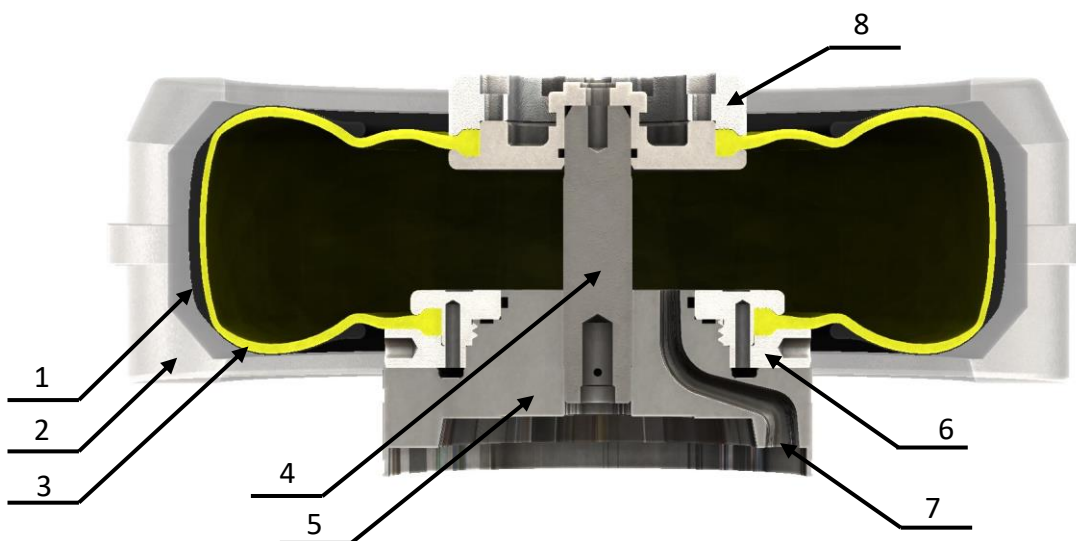


Figura 72: Conjunto do molde, vista frontal em corte.

No qual:

1. Pneu;
2. Molde;
3. Diafragma;
4. Haste do diafragma;
5. Cabeçote;
6. Anel inferior do diafragma;
7. Canal de inflação do vapor;
8. Anel superior do diafragma;

6.10 Anexo 10 – Propriedades do material da haste do diafragma

As propriedades da liga de aço 34CrNiMo6, que compõe haste do diafragma, podem ser visualizadas através da Tabela 21.

Tabela 21: Propriedades do material da haste (OVAKO, 2017).

Propriedade	Valor
Módulo de Young (GPa)	210
Coefficiente de Poisson	0,3
Módulo de cisalhamento (GPa)	80
Densidade (kg/m ³)	7800
Dilatação térmica 20 - 300° C (μm/m/K)	12
Calor específico 50/100° C (J/kg/K)	460 - 480
Condutividade térmica (W/m/K)	40 - 45
Resistência elétrica μΩm	0,2 – 0,25

