



## PROCESSO DE AQUECIMENTO DE MOLDES

**JOÃO CARLOS CORREIA GOMES**

outubro de 2018

## PROCESSO DE AQUECIMENTO DE MOLDES

João Carlos Correia Gomes

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica





## PROCESSO DE AQUECIMENTO DE MOLDES

João Carlos Correia Gomes  
1140690

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 Prof. Leonardo José da Silva Ribeiro.

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica





# JÚRI

**Presidente**

Engenheira Isabel Maria Garcia Sarmiento Pereira  
Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Orientador**

Engenheiro Leonardo José da Silva Ribeiro  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Co-orientador**

Engenheiro Filipe Marques Cunha Ferreira  
Chefe de Departamento da Produção 4, Continental Mabor- Indústria de Pneus S.A

**Arguente**

Doutora Ana Isabel Palmero Marrero  
Professora Auxiliar, Faculdade de Engenharia Da Universidade do Porto



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador do ISEP, Prof. Leonardo Ribeiro, pela sua incansável disponibilidade e paciência na ultrapassagem de todas as dúvidas que me iam surgindo. Agradeço igualmente ao meu orientador da Continental Mabor- Indústria de Pneus S.A, Eng. Filipe Ferreira, pela sua ajuda e orientação no meu crescimento técnico e pessoal no mundo empresarial. Agradeço de igual forma a todas as pessoas com quem convivi e me ajudaram durante o meu estágio na CMIP.

Um grande agradecimento aos meus pais pela paciência, esforço e a ajuda inalcançável durante todo o meu percurso académico.

Por fim, agradeço à minha namorada por todo o apoio e presença.



## **PALAVRAS CHAVE**

Palavras chaves do projecto: Transferência de calor, Vulcanização, Aquecimento de Moldes

## **RESUMO**

Para realizar a vulcanização de um pneu é necessário que exista enxofre e calor. A necessidade de calor no processo leva a gastos avultados com a energia gasta no aquecimento de moldes. A empresa Continental Mabor-Indústria de Pneus S.A. (CMIP) dedica-se à produção de pneus para veículos ligeiros de passageiros, veículos ligeiros de mercadorias e mais recentemente nos pneus para veículos agrícolas. Para o fabrico destes artigos a CMIP utiliza prensas hidráulicas e mecânicas com o aquecimento dos moldes a vapor saturado.

O projecto aqui elaborado estuda o comportamento do aquecimento do molde antes de entrar em produção. Este estudo vai utilizar conceitos de Transferência de Calor de forma a elaborar um modelo teórico que preveja a evolução das temperaturas durante o aquecimento dos moldes que existem na CMIP; o objectivo primeiro do trabalho é precisamente este.

Durante o projecto fizeram-se testes a diferentes tamanhos de molde durante o seu aquecimento em diferentes dispositivos existentes. A par dos testes, foi feito um estudo teórico dos diferentes modos de transferência de calor de forma a encontrar uma aproximação entre o real e o teórico.

Na fase final do trabalho fizeram-se recomendações para diminuir o tempo de aquecimento moldes nas prensas, o que será o segundo objectivo do trabalho. Estas mesmas recomendações foram testadas de forma a comprovar a diminuição de tempo.



**KEYWORDS**

*Keywords: Heat transfer, vulcanization, Mold heating*

**ABSTRACT**

*For vulcanization of a tire is necessary sulphur and heat. This necessity of heat in the process creates a high cost with steam consumption for heating moulds. The Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A produces tires for passenger vehicles, light trucks and, most recently, agriculture tires. To manufacture these tires, CMIP uses hydraulic and mechanical press with saturated steam for heating moulds.*

*This project studies the behaviour of heating moulds before the moulds go into production. This study will use heat transfer concepts to predict the evolution of the temperature during the heating of moulds that exist in CMIP; the main scope of this study is this.*

*During the project, different moulds and container sizes were tested during their heating in different places. Along with the tests, was made a theoretical study about different heat transfers modes to find a good approach between the theory and reality.*

*In the final phase, are made recommendations to decreased mould heating time in presses, which will be the second scope of this study. These recommendations were tested to prove this decrease of time.*



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

CMIP	Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A.
cond	Condução
conv	Convecção
DOT	<i>Department of Transportation, USA</i>
f.e.m	Força electromotriz
MC	Molde/Contentor
Máx	Máximo
Min	Mínimo
rad	Radiação
sup	Superfície
SUV	<i>Sport Utility Vehicles</i>
sur	Periferia
TWI	<i>Tread Wear Indicator</i>
Ton	Tonelada

### Lista de Unidades

°C	Grau Celsius
J	Joule
K	Kelvin
kg	Quilograma
h	Hora
min	Minutos
m	Metros
mm	Milímetros
N	Newton
rad	Radianos
W	Watt

---

**Caracteres Gregos**

---

$\alpha$	Difusibilidade térmica, $m^2 \cdot s^{-1}$
$\epsilon$	Emissibilidade
$\xi$	Parte da energia que entra no MC
$\rho$	Massa específica, $kg \cdot m^{-3}$
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
$\theta$	Ângulo, rad

---

**Lista de constantes**

---

Constante de Stefan-Boltzmann	$5,670 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
Aceleração gravitacional	$9,807 m \cdot s^{-2}$
Pressão atmosférica padrão	$101325 N \cdot m^{-2}$

---

## GLOSSÁRIO DE TERMOS

$A_{sup}$	Área da superfície de uma peça do MC, m <sup>2</sup>
$c$	Calor específico, J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$c_{Al}$	Calor específico da liga de alumínio, J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$c_{liga\ aço}$	Calor específico da liga de aço, J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$d$	Diâmetro, m
$e$	Espessura, m
$E_{acumulado}$	Energia acumulada no volume de controle, J
$E_{gerado}$	Energia gerada no volume de controle, J
$\dot{E}_{acumulado}$	Potência acumulada no volume de controle, W
$\dot{E}_{gerado}$	Potência gerada, W
$\dot{E}_{entra}$	Potência que entra no volume de controle, W
$\dot{E}_{sai}$	Potência que sai do volume de controle, W
$F$	Força, N
$g$	Aceleração gravitacional, m.s <sup>-2</sup>
$\Delta h$	Varição de entalpia, kJ.kg <sup>-1</sup>
$h'$	Entalpia específica de líquido saturado, kJ.kg <sup>-1</sup>
$h''$	Entalpia específica de vapor saturado, kJ.kg <sup>-1</sup>
$h_{conv}$	Coeficiente de convecção, W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
$k$	Condutibilidade térmica, W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
$L$	Comprimento, m
$l$	Largura do pneu, m
$m_{peça}$	Massa da peça, kg
$\dot{m}$	Caudal mássico, kg.s <sup>-1</sup>
$P$	Perímetro, m
$p$	Pressão, N.m <sup>-2</sup>
$Q$	Energia térmica, J
$q$	Potência térmica, W
$\dot{q}$	Potência térmica gerada por unidade de volume, W.m <sup>-3</sup>
$q''$	Fluxo térmico, W.m <sup>-2</sup>
$r$	Rácio, %
$R''_{cont}$	Resistência de contacto, K.W <sup>-1</sup>

---

$T$	Temperatura, K ou °C
$T_i$	Temperatura inicial, K ou °C
$T_{ar}$	Temperatura do ar, K ou °C
$T_{molde}$	Temperatura do molde, K ou °C
$T_{ref}$	Temperatura de referência para a vulcanização, °C
$T_{sup}$	Temperatura da superfície, K ou °C
$T_{sur}$	Temperatura da periferia, K ou °C
$T_{vs}$	Temperatura do vapor de água à saída, K ou °C
$t$	Tempo, s
$V$	Volume, m <sup>3</sup>
$v$	Volume específico, m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup>
$x, y, z$	Coordenadas cartesianas, m
$r, \theta, z$	Coordenadas cilíndricas
$A, B, C$	Incógnitas da equação

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: TEMPERATURA DO MOLDE: A) BAIXA TEMPERATURA NO MOLDE, B) CORRECTA TEMPERATURA NO MOLDE.	28
FIGURA 2: VISTA AÉREA DA CMIP [2].	33
FIGURA 3: COMPONENTES DE UM PNEU [4].	34
FIGURA 4: PROCESSO DE FABRICO DO PNEU: A) ARMAZÉM DE MATÉRIAS-PRIMAS, B) MISTURAÇÃO, C) PREPARAÇÃO, D) CONSTRUÇÃO, E) VULCANIZAÇÃO, F) INSPECÇÃO FINAL [4].	35
FIGURA 5: ESPECIFICAÇÕES DA PAREDE DO PNEU [6].	36
FIGURA 6: FORMAÇÃO DAS LIGAÇÕES CRUZADAS [7].	38
FIGURA 7: SENTIDO DO FLUXO DE CALOR (VERMELHO) E DA PRESSÃO SOBRE O PNEU (AZUL) [7].	39
FIGURA 8: MOLDE PARA UM PNEU DE INVERNO [10].	40
FIGURA 9: SEGMENTO COM PISO PARA UM PNEU DE INVERNO [10].	40
FIGURA 10: PAREDE [11].	41
FIGURA 11: ANEL DO TALÃO [11].	41
FIGURA 12: <i>EUROVENT</i> DENTRO DA CÂMARA DOS <i>EUROVENTS</i> [10]: A) FUROS PARA OS <i>EUROVENTS</i> , B) <i>EUROVENTS</i> .	41
FIGURA 13: VISTA LATERAL DE UM MOLDE MONTADO.	41
FIGURA 14: MOLDE (SÍMBOLO #) MONTADO DENTRO DE UM CONTENTOR (SÍMBOLO +) [12].	42
FIGURA 15: PEÇAS CONSTITUINTES DO CONTENTOR.	43
FIGURA 16: REPRESENTAÇÃO DA PLACA INFERIOR DO CONTENTOR: A) SEM CÂMARA DE VAPOR, B) COM CÂMARA DE VAPOR.	44
FIGURA 17: EXEMPLO DE UMA PRENSA: A) CAVIDADE FECHADA; B) CAVIDADE ABERTA COM UM PNEU VERDE PARA VULCANIZAR.	45
FIGURA 18: PRATOS COM CÂMARA DE VAPOR.	45
FIGURA 19: ESQUEMA DA LIGAÇÃO ENTRE A LINHA DE VAPOR E A PRENSA: A) CONTENTOR COM CÂMARA DE VAPOR NA PLACA INFERIOR, B) SEM CÂMARA DE VAPOR NA PLACA INFERIOR.	46
FIGURA 20: ISOLAMENTO TÉRMICO UTILIZADO NAS PRENSAS: A) VISÃO ISOMÉTRICA, B) VISTA DE PORMENOR.	46
FIGURA 21: INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA USADOS NA PRENSA: A) PT100 LOCALIZADA NO COLECTOR DE VAPOR À SAÍDA. B) PT100 LOCALIZADA NUM DOS SEGMENTOS (CÍRCULO A VERMELHO).	47
FIGURA 22: MESA DE AQUECIMENTO.	48
FIGURA 23: LIGAÇÕES DE VAPOR ENTRE O CONJUNTO MC E A MESA DE AQUECIMENTO.	48
FIGURA 24: LOCALIZAÇÃO DA CONDUTA EM RELAÇÃO À MESA DE AQUECIMENTO.	49
FIGURA 25: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM TERMOPAR [14].	53
FIGURA 26: MEDIÇÃO DA F.E.M CRIADA [14].	53
FIGURA 27: TROCA DE ENERGIA ENTRE DOIS MEIOS [17].	55
FIGURA 28: MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR: A) CONDUÇÃO, B) CONVECÇÃO, C) RADIAÇÃO [18].	55

FIGURA 29: ELEMENTO DE VOLUME PARA DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DE CALOR EM COORDENADAS CILÍNDRICAS [18].	56
FIGURA 30: CONSERVAÇÃO DA ENERGIA NUM VOLUME DE CONTROLO NUM INSTANTE [18].	56
FIGURA 31: COMPONENTES CILÍNDRICAS NO CONJUNTO MC	57
FIGURA 32: TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO [18]: A) FORÇADA, B) NATURAL.	58
FIGURA 33: TROCA DE CALOR POR RADIAÇÃO NA: A) PRENSA, B) MESA DE AQUECIMENTO.	59
FIGURA 34: REPRESENTAÇÃO DA QUEDA DA TEMPERATURA ENTRE DUAS SUPERFÍCIES [18].	60
FIGURA 35: DESCRIÇÃO GRÁFICA DO MÉTODO DE RUNGE-KUTTA [19].	61
FIGURA 36: DESCRIÇÃO GRÁFICA DAS ESTIMATIVAS DE INCLINAÇÃO ENVOLVIDAS NO MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE QUARTA ORDEM [19].	62
FIGURA 37: BALANÇO DE ENERGIA POR CONSERVAÇÃO DA ENERGIA DE UMA SUPERFÍCIE PARA O MEIO [18].	63
FIGURA 38: POSICIONAMENTO DOS PONTOS NUM CONJUNTO MC: A) SEGUNDO $\theta$ , B) SEGUNDO $R$ , $Z$ .	69
FIGURA 39: FIXAÇÃO DOS TERMOPARES NO MOLDE: A) RECURSO A ÍMANES, B) RECURSO A <i>EUROVENTS</i> .	70
FIGURA 40: TERMOPARES FIXADOS NOS SEGMENTOS, NA PAREDE SUPERIOR E NO ANEL DO TALÃO SUPERIOR.	71
FIGURA 41: CONTENTOR FECHADO E PRONTO PARA EFECTUAR OS TESTES.	71
FIGURA 42: LIGAÇÕES DE VAPOR ENTRE O CONJUNTO MC E A MESA DE AQUECIMENTO.	73
FIGURA 43: MEDIÇÕES AO CONJUNTO MC MONTADO NA MESA DE AQUECIMENTO.	73
FIGURA 44: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 175/65 R14 MONTADO NO CONTENTOR EGS.	75
FIGURA 45: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 195/55 R16 MONTADO NO CONTENTOR EGS.	76
FIGURA 46: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 225/60 R16 MONTADO NO CONTENTOR EGV.	77
FIGURA 47: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 225/55 R17 MONTADO NO CONTENTOR EGV.	78
FIGURA 48: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 225/40 R18 MONTADO NO CONTENTOR EGV.	79
FIGURA 49: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 275/40 R18 MONTADO NO CONTENTOR EGX.	80
FIGURA 50: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 295/25 R20 MONTADO NO CONTENTOR EGX.	81
FIGURA 51: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 265/65 R17 MONTADO NO CONTENTOR G46.	82
FIGURA 52: MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO MOLDE NA PRENSA.	85
FIGURA 53: ESQUEMA DOS APARELHOS DE MEDIDA NAS TUBAGENS DE UMA CAVIDADE.	86
FIGURA 54: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 195/55 R16 MONTADO NO CONTENTOR EGS.	89
FIGURA 55: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 225/55 R16 MONTADO NO CONTENTOR EGV.	90
FIGURA 56: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 225/55 R17 MONTADO NO CONTENTOR EGV.	91
FIGURA 57: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 225/40 R18 MONTADO NO CONTENTOR EGV.	92
FIGURA 58: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 275/40 R18 MONTADO NO CONTENTOR EGX.	93
FIGURA 59: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 295/25 R20 MONTADO NO CONTENTOR EGX.	94
FIGURA 60: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 205/80 R16 MONTADO NO CONTENTOR EG43.	95
FIGURA 61: GRÁFICO T(T) DA MEDIDA 255/50 R20 MONTADO NO CONTENTOR G46.	97
FIGURA 62: EXEMPLO DE UMA POSSÍVEL MESA DE AQUECIMENTO: A) VISTA FRONTAL, B) VISTA DE TRÁS.	103
FIGURA 63: GRÁFICO DA TEMPERATURA MÉDIA DO AQUECIMENTO SEM PRESSÃO VS. AQUECIMENTO COM PRESSÃO, PARA CONTENTORES COM CÂMARA DE VAPOR INFERIOR.	106
FIGURA 64: CONJUNTO MC FECHADO: A) SEGMENTOS SEPARADOS, B) SEGMENTOS JUNTOS.	107

---

FIGURA 65: GRÁFICO DA TEMPERATURA MÉDIA DO AQUECIMENTO SEM PRESSÃO VS. AQUECIMENTO COM PRESSÃO, PARA UM CONTENTOR SEM CÂMARA DE VAPOR INFERIOR (G46).	108
FIGURA 66: EQUIPAMENTO PARA RECOLHA DE DADOS: A) <i>DATALOGGER AGIL II 80C535</i> . B) COMPUTADOR <i>HP COMPACT NC6400</i> COM O SOFTWARE <i>MESURE</i> A CORRER.	121
FIGURA 67: FIOS TERMOPAR LIGADOS AO TERMINAL.	122
FIGURA 68: CONFECÇÃO DOS TERMOPARES: A) FIOS DECAPADOS; B) CRIAÇÃO DO PONTO DE UNIÃO; C) TERMOPAR FINALIZADO.	123
FIGURA 69: FIOS DO TERMOPAR INSERIDOS NO TÚNEL.	123



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1: INFORMAÇÃO BÁSICA EXISTENTE NO PNEU [5].	37
TABELA 2: COMPORTAMENTO DAS PROPRIEDADES VS. AUMENTO DA DENSIDADE DAS LIGAÇÕES [7].	38
TABELA 3: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS CONTENTORES.	43
TABELA 4: PROPRIEDADES DO VAPOR NA LINHA À ENTRADA/SAÍDA.	47
TABELA 5: TIPOS DE TERMOPARES [16].	54
TABELA 6: VALORES TÍPICOS PARA O COEFICIENTE DE CONVECÇÃO [18].	58
TABELA 7: VALORES DA RESISTÊNCIA DE CONTACTO PARA DIFERENTES PRESSÕES DE CONTACTO ( $R''_x \cdot 10^4$ ) ( $M^2.K.W^{-1}$ ).	60
TABELA 8: POSIÇÕES DOS CANAIS NO MOLDE.	70
TABELA 9: MEDIDAS E CONTENTORES SELECIONADOS PARA OS TESTES.	72
TABELA 10: CONTENTORES, MEDIDAS E MASSAS DOS MOLDES USADOS PARA TESTE.	74
TABELA 11: TEMPERATURA MAIS BAIXA ATINGIDA AO FIM DE 4H DE AQUECIMENTO.	83
TABELA 12: CONTENTORES, MEDIDAS E MASSA DOS MOLDES USADOS NOS TESTES.	86
TABELA 13: DIFERENÇA DE TEMPERATURA MÉDIA ( $^{\circ}C$ ) DE CADA PEÇA, SEGUNDO A COORDENADA $\theta$ .	88
TABELA 14: TEMPO NECESSÁRIO PARA AQUECIMENTO DO MOLDE.	96
TABELA 15: TEMPO NECESSÁRIO PARA AQUECIMENTO DO MOLDE.	98
TABELA 16: VALORES CALCULADOS DO $A$ , $B$ E $C$ PARA A MEDIDA 195/55 R16 MONTADA NO CONTENTOR EGS	99
TABELA 17: VALORES CALCULADOS DE $A$ , $B$ E $C$ PARA AS MEDIDAS 225/40 R18, 225/55 R17 E 225/60 R16 MONTADAS NO CONTENTOR EGV	99
TABELA 18: VALORES CALCULADOS DE $A$ , $B$ E $C$ DAS MEDIDAS 275/40 R18 E 295/25 R20 MONTADAS NO CONTENTOR EGX	99
TABELA 19: VALORES CALCULADOS DE $A$ , $B$ E $C$ DA MEDIDA 205/80 R16 MONTADAS NO CONTENTOR EG43	100
TABELA 20: VALORES CALCULADOS DE $A$ , $B$ E $C$ DA MEDIDA 255/50 R20 MONTADAS NO CONTENTOR G46	100
TABELA 21: VALORES DE $S_{y/x}$ , $R^2$ E $R$ DA MEDIDA 195/55 R16, CONTENTOR EGS	100
TABELA 22: VALORES DE $S_{y/x}$ , $R^2$ E $R$ DAS MEDIDAS 225/40 R18, 225/55 R17 E 225/60 R16, CONTENTOR EGV	100
TABELA 23: VALORES DE $S_{y/x}$ , $R^2$ E $R$ DAS MEDIDAS 275/40 R18 E 295/25 R20, CONTENTOR EGX	101
TABELA 24: VALORES DE $S_{y/x}$ , $R^2$ E $R$ DA MEDIDA 205/80 R16, CONTENTOR EG43	101
TABELA 25: VALORES DE $S_{y/x}$ , $R^2$ E $R$ DA MEDIDA 255/80 R20, CONTENTOR G46	101
TABELA 26: EXEMPLO DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES.	123
TABELA 27: CARACTERÍSTICAS TERMOFÍSICAS DA LIGA 3.3547.	124
TABELA 28: CARACTERÍSTICAS TERMOFÍSICA DA LIGA 1.0570.	124
TABELA 29: CARACTERÍSTICAS TERMOFÍSICAS DO LÍQUIDO E VAPOR SATURADO [23] .	125



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>27</b>
<b>1.2</b>	<b>Objectivos</b>	<b>28</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do relatório</b>	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>EMPRESA E PROCESSO</b>	<b>33</b>
<b>2.1</b>	<b>Empresa e o pneu</b>	<b>33</b>
2.1.1	Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A (CMIP)	33
2.1.2	Produto	34
2.1.3	Processo de fabrico do pneu	35
2.1.4	Informação na parede do pneu	36
<b>2.2</b>	<b>Vulcanização</b>	<b>37</b>
<b>2.3</b>	<b>Molde</b>	<b>40</b>
<b>2.4</b>	<b>Contentor</b>	<b>42</b>
<b>2.5</b>	<b>Prensa</b>	<b>45</b>
<b>2.6</b>	<b>Mesa de aquecimento</b>	<b>48</b>
<b>3</b>	<b>BASE TEÓRICA</b>	<b>53</b>
<b>3.1</b>	<b>Sensor termoeléctrico- Termopar</b>	<b>53</b>
<b>3.2</b>	<b>Transferência de calor</b>	<b>55</b>
3.2.1	Condução	55
3.2.2	Convecção	57
3.2.3	Radiação	58
3.2.4	Resistência de contacto	60
<b>3.3</b>	<b>Métodos numéricos</b>	<b>61</b>
3.3.1	Runge-Kutta de 4º ordem [19]	61
3.3.2	Regressão por mínimos quadrados [19]	62

<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>69</b>
<b>4.1</b>	<b>Preparação do molde para os testes</b> .....	<b>69</b>
<b>4.2</b>	<b>Aquecimento dos moldes na mesa de aquecimento</b> .....	<b>73</b>
4.2.1	Processo experimental .....	73
4.2.2	Resultados e Conclusões .....	74
<b>4.3</b>	<b>Aquecimento dos moldes nas prensas</b> .....	<b>85</b>
4.3.1	Procedimento experimental.....	85
4.3.2	Resultados e discussão .....	87
<b>4.4</b>	<b>Ajuste do polinómio <math>T=T(t)</math></b> .....	<b>99</b>
<b>4.5</b>	<b>Propostas de melhoria</b> .....	<b>103</b>
4.5.1	Mesa de aquecimento.....	103
4.5.2	Prensa.....	105
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>113</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões</b> .....	<b>113</b>
<b>5.2</b>	<b>Trabalhos futuros</b> .....	<b>114</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO</b> .....	<b>117</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>121</b>
<b>7.1</b>	<b>Anexo 1</b> .....	<b>121</b>
7.1.1	Aquisição de dados.....	121
<b>7.2</b>	<b>Anexo 2</b> .....	<b>122</b>
7.2.1	Confecção dos termopares.....	122
7.2.2	Calibração dos termopares .....	123
<b>7.3</b>	<b>Anexo 3</b> .....	<b>124</b>
7.3.1	Liga de alumínio .....	124
7.3.2	Liga de aço .....	124
7.3.3	Fluido térmico .....	125

# 1. INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objectivos
- 1.3 Estrutura do relatório



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Nos dias que correm a eficiência energética e a redução dos custos com o desperdício feito por um processo são cada vez mais debatidos nas empresas. Se uma empresa reduzir os custos com o desperdício de energia e também com o de matérias-primas mal utilizadas durante o processo de fabrico, essa mesma empresa aumenta a sua produtividade, competitividade e torna-se ao mesmo tempo uma empresa mais amiga do ambiente.

A Continental Mabor - Indústria de Pneus S.A. (CMIP) não é excepção. Transcrevendo a sua política, podemos constatar isso bem presente [1] :

“A política da Continental Mabor assenta na sua Visão  
Ser LIDER na Divisão de Pneus da Continental

Lousado eficiente,  
Inova e antecipa as necessidades dos clientes,  
Desenvolve produtos de alta qualidade,  
Excelente no conhecimento e nos processos,  
Rentável de forma sustentada.”[1]

são ainda compromissos da CMIP

“.....

**Prevenir os acidentes** graves envolvendo substâncias perigosas e **controlar a poluição;**

Usar racionalmente os **recursos naturais;**

.... “ [1]

Tendo em mente a sua política, a empresa propôs um estudo do pré-aquecimento dos moldes para pneus. Este pré-aquecimento actualmente assenta em conhecimentos empíricos, aplicados a todos os moldes e contentores que se pretendem aquecer; e é feito de modo a garantir que a temperatura do molde seja igual à temperatura necessária para realizar a vulcanização do pneu. A vulcanização é um processo onde são aplicados calor e pressão aos pneus em “verde” (pneu não vulcanizado).

Neste processo são conferidas à borracha as propriedades físicas (resistência à temperatura, resistência ao rolamento, ...) e propriedades químicas (criação de ligações cruzadas), assim como a forma final que o consumidor final conhece. Contudo, devido à diversidade de geometrias dos moldes, aos diferentes tamanhos e características dos contentores existentes e ainda ao desconhecimento da forma como evolui a temperatura no molde ao longo do tempo, o pré-aquecimento é, por vezes, imperfeito. Daqui resulta que haja pneus com imperfeições devido a falta de temperatura para o arranque do processo de vulcanização (Figura 1).

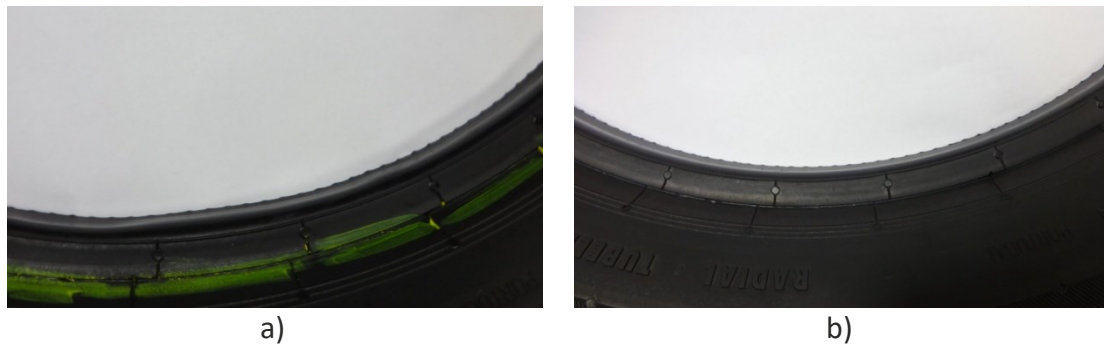


Figura 1: Temperatura do molde: a) baixa temperatura no molde, b) correcta temperatura no molde.

Na Figura 1.a observa-se um pneu com imperfeições na zona do talão. Isto acontece porque a temperatura do molde nesta zona não era a ideal para realizar a vulcanização. Na Figura 1.b, encontra-se um pneu em que a temperatura no anel do talão era a ideal para ocorrer a vulcanização.

## 1.2 Objectivos

O objectivo deste projecto é, depois de conhecer o gradiente de temperaturas ao longo do tempo no molde sem pneu, tornar o pré-aquecimento desse molde mais eficiente e rentável. Para isso, criar-se-á um modelo matemático que possa ser aplicável a cada um dos diferentes moldes e contentores existente na CMIP.

Para realizar-se este projecto, definiram-se várias tarefas: análise e identificação dos diferentes processos de transferência de calor associados ao pré-aquecimento do molde; análise do funcionamento dos meios existentes para o pré-aquecimento do molde; elaborar um primeiro esboço de um modelo matemático.

A tarefa seguinte é medir-se, com termopares, as temperaturas do molde durante o pré-aquecimento na prensa e na mesa de aquecimento. Com isto pretende-se fazer uma análise mais profunda da evolução da temperatura nos diferentes pontos do molde. Também se realiza uma comparação entre os valores obtidos no pré-aquecimento na mesa de aquecimento e na prensa. A partir destes valores é ajustado o modelo matemático desenhado inicialmente.

Por último, fazem-se recomendações para diminuir o tempo de aquecimento de moldes nas prensas e na mesa de aquecimento. São feitos dois testes de forma a comprovar a eficácia das recomendações feitas para o aquecimento de moldes nas prensas.

### 1.3 Estrutura do relatório

Este relatório é constituído por 7 capítulos.

O capítulo 1 dedica-se essencialmente à introdução do trabalho e apresenta o enquadramento do tema em questão, assim como os objectivos pretendidos com este trabalho.

No capítulo 2 dar-se-á a conhecer a empresa, todo o processo de fabrico e a própria constituição de um pneu. Também é neste capítulo que se irá fazer uma revisão acerca da vulcanização e do equipamento utilizado para esta etapa.

No capítulo 3 procede-se a uma revisão de tópicos acerca dos diferentes tipos de transferência de calor, como também, dos métodos numéricos utilizados.

O capítulo 4 chama-se desenvolvimento, estando dividido por 5 subcapítulos. Começa-se por explicar a disposição e as medidas escolhidas para os testes no subcapítulo 4.1. Passa-se para o subcapítulo 4.2, onde será abordado o processo de aquecimento na mesa de aquecimento e expor-se-á a forma de como se realizaram as medições. Aqui também é feita discussão dos resultados experimentais. No subcapítulo 4.3 analisar-se-ão os valores obtidos nas medições durante o pré-aquecimento na prensa e descrever-se-á também o processo experimental efectuado para a recolha de dados. Tendo todas as conclusões retiradas das medições feitas, ajusta-se o polinómio  $T=T(t)$  aos valores experimentais, estando este exposto no subcapítulo 4.4. Para terminar, no subcapítulo 4.5 existem recomendações para ganhos que se podem obter ao aplicar certos procedimentos ao aquecimento de moldes.

As principais conclusões retiradas na realização deste projecto e acções que podem ser tomadas num futuro próximo são efectuadas no capítulo 5.

Para finalizar este relatório, são apresentados no capítulo 6 as referências de informação utilizadas e no capítulo 7, apresentam-se os anexos.



## **2. EMPRESA E PROCESSO**

- 2.1 Empresa e o pneu**
- 2.2 Vulcanização**
- 2.3 Molde**
- 2.4 Contentor**
- 2.5 Prensa**
- 2.6 Mesa de aquecimento**



## 2 EMPRESA E PROCESSO

### 2.1 Empresa e o pneu

#### 2.1.1 Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A (CMIP)

O desenvolvimento do projecto foi feito na empresa Continental Mabor – Indústria de Pneus S.A (CMIP), ver Figura 2. A CMIP foi fundada em 1989, na freguesia de Lousado, Vila Nova de Famalicão. Esta empresa é o resultado da aquisição da antiga fábrica Mabor- Manufatura Nacional de Borrachas, S.A pelo Grupo *Continental AG* [1].



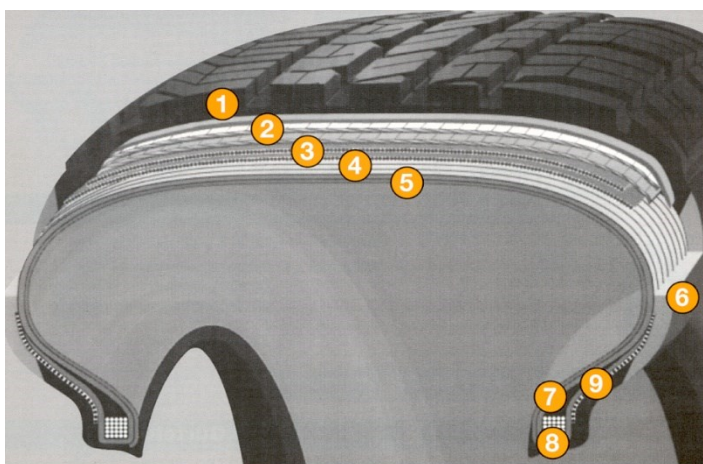
Figura 2: Vista aérea da CMIP [2].

Actualmente a CMIP dispõe de uma superfície empresarial de 148000 m<sup>2</sup> e conta com cerca de 1800 trabalhadores no final de 2015 [2]. A CMIP terminou o ano de 2015 com uma produção de 17,5 milhões de pneus [2]. Esta empresa produz pneus com diâmetro de *jante* desde as 14" às 22", e 97% dos pneus produzidos são exportados, sendo no ano 2015, a 4<sup>o</sup> maior exportadora do país [3]. Os mercados que consomem os pneus fabricados são: mercado dos equipamentos de origem e o mercado de substituição. Este último é o que absorve a maior parte da produção. Neste momento existe uma nova linha de produção de pneus agrícolas *Premium (LousAgro)* assim como um Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de pneus agrícolas.

A *Continental AG* está representada em Portugal não só pela CMIP, mas também pelas seguintes empresas: *Continental Pneus* (comercialização dos pneus produzidos pela *Continental AG*, em Portugal), *Continental- Indústria têxtil do Ave* (artigos têxteis para a indústria de borracha), *Continental Lemmerz* (montagem dos conjuntos pneu-jante) e *Continental Teves* (sistemas de travagem).

### 2.1.2 Produto

Na CMIP fabrica-se, neste momento, pneus que vão desde a *jante 14"* até à *jante 22"*. O seu portfólio inclui pneus destinados a veículos ligeiros, *SUV's (Sport Utility Vehicles)*, veículos de tracção total, veículos desportivos e *Vans*. Embora sejam produzidos pneus da marca *Continental AG*, a produção também se estende a outras marcas do grupo: *Mabor, Uniroyal, General Tires, Barum, Semperit, Gislaved/Vinking*, entre outras. Os componentes utilizados para a produção podem variar consoante as especificações técnicas pretendidas, mas existem os que são essenciais para a produção de um pneu. A Figura 3 apresenta, de uma forma clara e simples, os componentes gerais utilizados.



#### Legenda

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

Figura 3: Componentes de um pneu [4].

Os componentes necessários para a construção do pneu, ver Figura 3, possuem as seguintes funções [5]:

- **Piso:** Parte do pneu que fica em contacto directo com o solo tendo como objectivos expulsar a água, oferecer boa duração ao desgaste e boa aderência à estrada. Deriva de um perfil extrudido, que depois da vulcanização toma o desenho final.
- **Cunha, núcleo e reforço do talão:** Os talões oferecem ao pneu a força necessária para que este esteja montado na jante. É constituído necessariamente por fios de arame de alta resistência revestidos de um composto à base de borracha.
- **Parede:** Responsável por fornecer a resistência à abrasão da parede lateral. Construído em perfis de uma mistura de borrachas extrudidas.
- **Cinta têxtil e metálica:** Basicamente são camadas de borracha com fios impregnados. A cinta têxtil é responsável por impossibilitar a expansão do pneu devido a altas velocidades. A cinta metálica contribui para manter a estabilidade necessária da pressão interna de modo a suportar cargas e impactos laterais.
- **Tela têxtil:** Impregnação de uma camada têxtil com duas de borracha. Tem como função ajudar o reforço estrutural do pneu.

- **Camada estanque:** Obtém-se a partir de uma camada à base de borracha extrudada. Esta camada possui uma baixa permeabilidade funcionando assim como câmara de ar.

### 2.1.3 Processo de fabrico do pneu

A produção de um pneu pode ser resumida em apenas 5 passos essenciais, desde a mistura dos compostos até à inspeção final. Cada passo é controlado por um departamento específico, de modo a ser controlado com rigor. O processo é então descrito sucintamente na Figura 4:

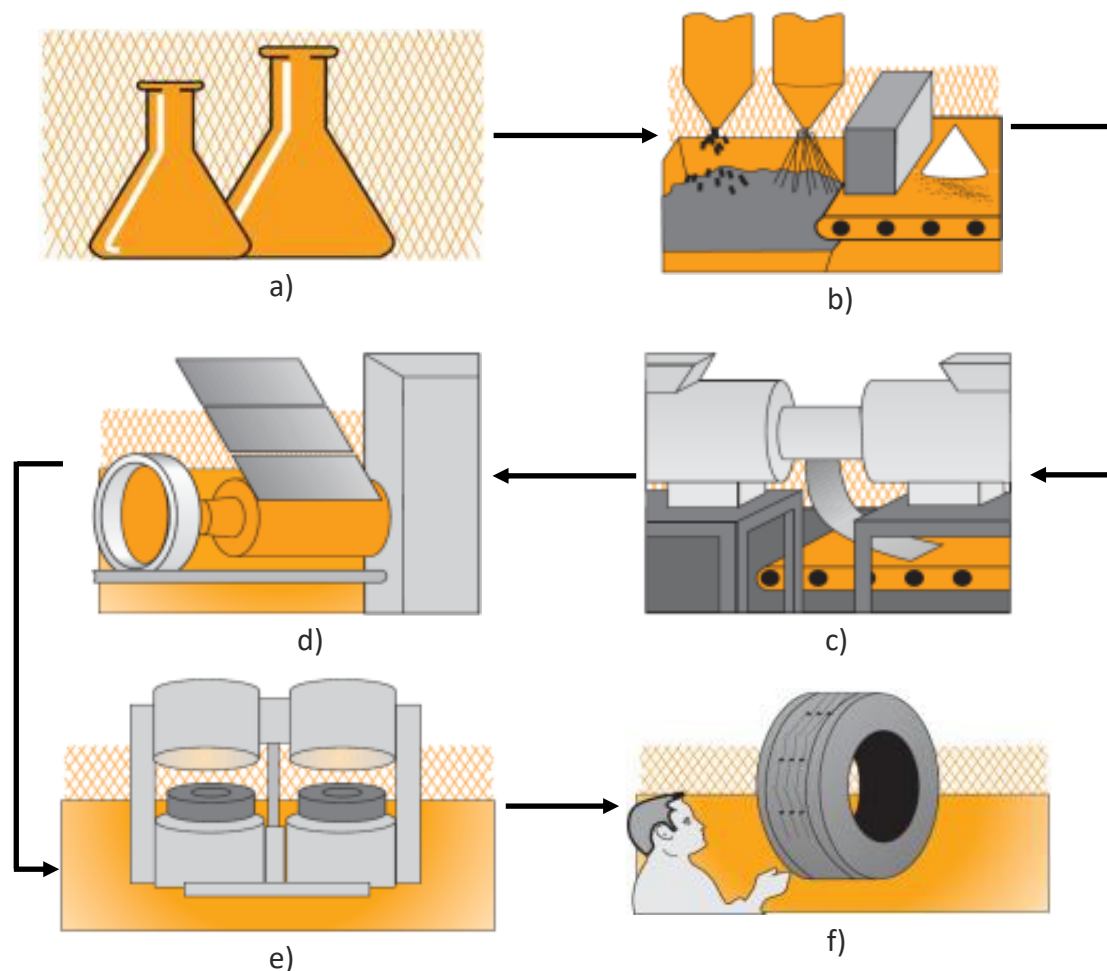


Figura 4: Processo de fabrico do pneu: a) Armazém de matérias-primas, b) Misturação, c) Preparação, d) Construção, e) Vulcanização, f) Inspeção final [4].

Todas estas fases do processo estão divididas em departamentos. Na Figura 4.b, está representado o Departamento I - Misturação. Esta fase é o início do processo, onde são misturadas as matérias-primas necessárias para a fabricação de um pneu: borracha, pigmentos, óleo mineral, sílica, negro de fumo, entre outros.

Terminada a mistura, passa-se para a preparação dos componentes. Esta fase (Figura 4.c) diz respeito ao departamento II – Preparação. Este departamento é responsável por produzir todos os componentes existentes no pneu, recorrendo a extrusoras, calandras

e máquinas de corte. Concluída a produção dos componentes, estes passam para o outro nível do processo: a construção.

O departamento III – Construção (Figura 4.d) é responsável por montar todos os componentes formando assim o pneu em “verde” (Pneu sem vulcanização). São utilizadas máquinas “KM” (constrói a carcaça do pneu) e “PU” (juntam a cinta metálicas, cintas têxteis e piso à carcaça).

Acabada a construção, passa-se para a vulcanização. O departamento IV - Vulcanização (Figura 4.e) é responsável por esta fase. É aqui que o pneu em “verde” toma as características e o aspecto final que se pretende, submetendo-o a elevadas temperaturas e pressões nas prensas.

De forma a garantir que o pneu vulcanizado está dentro dos requisitos é feita uma inspeção. O departamento V – Inspeção Final (Figura 4.f) está encarregue de fazer as verificações necessárias de modo a garantir todos os requisitos e padrões de qualidade. Os pneus aprovados seguem para o armazém de produtos acabados, terminando assim o seu processo de fabrico. Os não aprovados são reparados ou enviados para a reciclagem dependendo da imperfeição que possuir.

#### 2.1.4 Informação na parede do pneu

Na parede do pneu, ver Figura 5, existe um conjunto de códigos que dizem respeito às características do pneu. Estes códigos especificam a medida do pneu, o fabricante, a data da produção, entre outras informações. A título de exemplo, na Figura 5 está o modelo *ContiPremiumContact 5* (modelo da marca *Continental AG*). Na parede deste pneu observam-se vários códigos, estando estes descritos na Tabela 1.

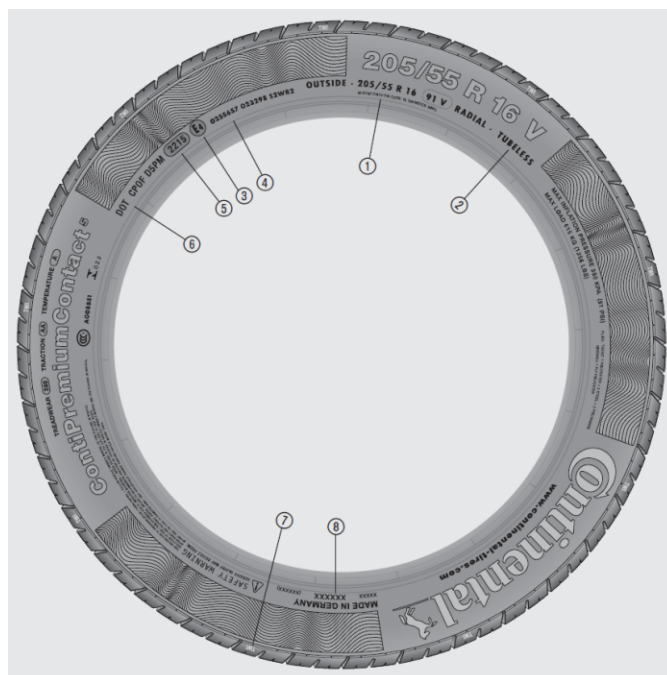


Figura 5: Especificações da parede do pneu [6].

Tabela 1: Informação básica existente no pneu [5].

Código	Especificação
① 205/55 R16 91 V	205 – Largura do pneu em mm
	55 – Razão entre a altura da parede e a largura do piso, em % Neste caso a altura da parede é 55% da largura do piso.
	R – Símbolo para pneu radial (RF para pneu <i>runflat</i> )
	16 – Código para o diâmetro da jante em polegadas
	91 – Índice de carga máxima suportada pelo pneu (91= 615kg)
	V – Índice da velocidade máxima suportada (V= 240 km/h)
② TUBELESS	Informação de que este pneu não necessita de câmara de ar ( <i>TUBE TYPE</i> no caso de ser necessário montar câmara de ar com o pneu)
③ E <sub>4</sub>	Marca indicativa de que o pneu está de acordo com a regulamentação da UN/ECE. O número após o E, indica o país da homologação (4 = Holanda)
④	Número de aprovação da UN/ ECE
⑤ 2215	Código de produção: os dois primeiros dígitos são a semana em que foi produzido, enquanto os dois últimos dígitos o ano. “22” significa semana 22 e o “15” significa 2015
⑥ DOT	DOT = <i>Department of Transportation, USA.</i>
⑦ TWI	TWI = <i>Tread Wear Indicator</i>
⑧ <i>Made in Germany</i>	Local de produção do pneu

## 2.2 Vulcanização

A vulcanização é um processo que transforma a borracha do estado plástico para um estado elástico através de um processo químico de ligações cruzadas que são criadas através da adição de calor, enxofre e catalisadores [7]. A descoberta deste processo deve-se ao trabalho de três pesquisadores – Nathaniel Hayward, Thomas Hancock e Charles Goodyear – com o intuito de contornar os comportamentos negativos que a borracha possuía até à descoberta do processo: deformação permanente quando submetida a um esforço mecânico, assim como uma superfície pegajosa. Entre 1832-1834, Nathaniel Hayward e Fedrich Ludersdorf descobriram que a borracha misturada com enxofre e exposta ao sol tornava-se menos viscosa [8].

Após esta descoberta, Thomas Hancock e Charles Goodyear trabalharam neste mesmo problema, descobrindo que ao aquecer o composto de borracha e enxofre, obtinham

propriedades superiores aos da borracha original, tais como aumento da dureza, redução da pegajosidade, entre outros. A palavra vulcanização foi inventada por Thomas Hancock, que deriva do Vulcano (deus do fogo na mitologia romana), significando o calor e o enxofre utilizado no processo [8].

Segundo Bhowmick e Mangaraj [9] a vulcanização é “o processo pelo qual materiais elastómeros ou borrachas são convertidos numa cadeia tridimensional através da ligação das cadeias independentes.” [9]. Por outras palavras, “é o processo químico que produz as ligações cruzadas na cadeia polimérica” [7]. Para que haja vulcanização é necessário calor e enxofre. O enxofre é responsável por criar as ligações cruzadas entre as redes lineares, enquanto o calor desencadeia estas reacções. Na Figura 6 está uma cadeia de moléculas de borracha por vulcanizar, encontrando-se maleável devido a não haver ligações entre as moléculas. Ao vulcanizar esta cadeia, as várias moléculas vão unir-se, através de ligações cruzadas (pontos cinzas), tornando-se assim uma cadeia mais forte. A densidade destas redes é responsável por ditar o comportamento das propriedades físicas, como se pode observar na Tabela 2.

Tabela 2: Comportamento das propriedades Vs. aumento da densidade das ligações [7].

Propriedades	Comportamento
Dureza	Aumenta
Módulo de Young	Diminui
Tensão de rotura	Diminui
Resistência à fadiga	Aumenta
Resistência ao desgaste	Aumenta
Resiliência	Aumenta

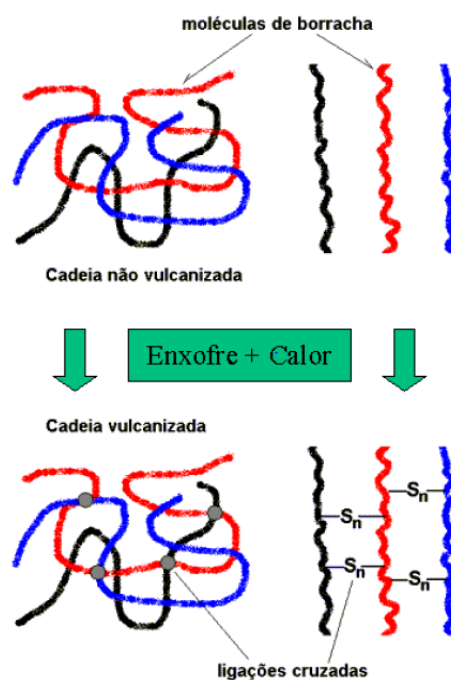


Figura 6: Formação das ligações cruzadas [7].

Na indústria de pneus, não se utiliza só borracha no seu estado puro. Faz-se uma mistura de vários compostos de forma a torná-la mais útil. Estes compostos têm como função melhorar as propriedades físicas da borracha, prolongar a sua vida útil e tornar a vulcanização mais rápida. Para isso utilizam-se os seguintes compostos [7]:

- Polímeros: Borracha natural ou sintética;
- Agentes vulcanizantes: Composto utilizado para criar as ligações. O mais utilizado é o enxofre;
- Activadores de vulcanização: Serve para activar rapidamente os aceleradores de forma a tornar a vulcanização mais rápida;
- Catalisadores: Tem a função de tornar a vulcanização mais rápida. Uma vulcanização só com enxofre demora em média 5 horas com  $T=140^{\circ}\text{C}$ . Com os catalisadores, a vulcanização demora cerca de 10 min com  $T=170^{\circ}\text{C}$ .

Para ocorrer a vulcanização também é necessário introduzir energia para que haja formação das ligações cruzadas. A forma de introduzir calor no processo é através da utilização de moldes aquecidos que, além de fornecerem calor, conferem à borracha a forma que se pretende no final do ciclo de vulcanização. Para isso o pneu em “verde” é colocado dentro do molde e posteriormente este é fechado. Dentro do molde existe um diafragma que vai empurrar o pneu contra o molde a altas pressões de modo a dar ao pneu a forma que se pretende. Para opor às forças internas do diafragma, o molde encontra-se fechado com uma pressão que é imposta por prensas. Na Figura 7 observa-se o sentido do fluxo de calor (setas vermelhas) e o sentido da pressão (setas azuis) aplicada sobre o pneu em verde (parte vermelha). A preto está representado o diafragma dentro do molde.

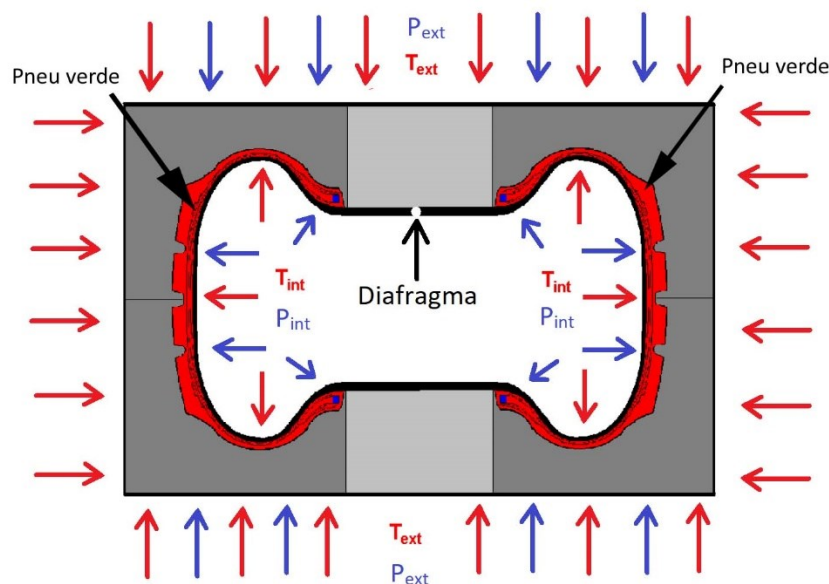


Figura 7: Sentido do fluxo de calor (vermelho) e da pressão sobre o pneu (azul) [7].

## 2.3 Molde

O molde, ver Figura 8, é um conjunto de peças que tem a função de dar a forma final que se pretende ao pneu em “verde”, durante a vulcanização. É constituído por segmentos, paredes do pneu e anéis do talão. Estas peças quando estão todas unidas dão a forma final do pneu.

Os segmentos, ver Figura 9, são responsáveis por dar ao pneu em “verde” a forma que o piso deve tomar. Para isso, estas peças são maquinadas a partir de blocos de alumínio ou fabricadas com alumínio fundido. Os moldes podem ser compostos por 9 ou 11 segmentos, dependendo essencialmente da dimensão do pneu, sendo que os moldes com 11 segmentos são utilizados em pneus com dimensões grandes.



Figura 8: Molde para um pneu de Inverno [10].

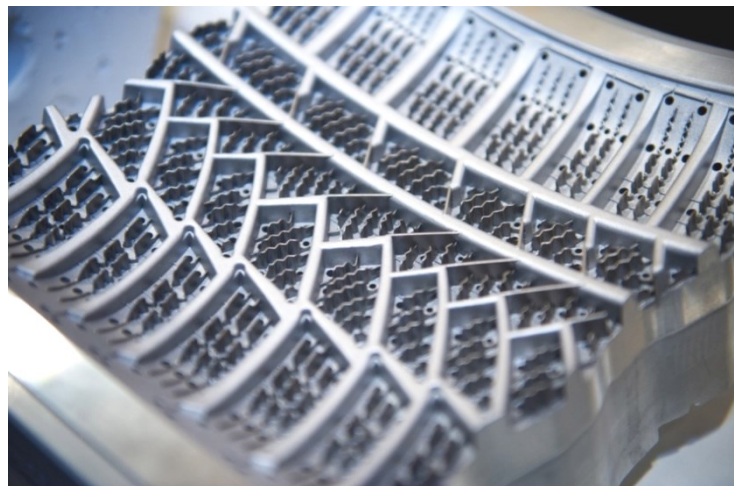


Figura 9: Segmento com piso para um pneu de Inverno [10].

As paredes, ver Figura 10, são responsáveis por gravar no pneu verde todas as informações acerca do pneu (ver capítulo 2.1.4, página 36), assim como, dar a forma final à parede. Esta peça é fabricada em liga de aço. Os anéis do talão, ver Figura 11, têm como função dar uma forma ao talão que impeça que o ar escape entre o pneu e a jante. Esta peça é também fabricada em liga de aço. No Anexo 7.3 estão as propriedades termofísicas dos materiais de todas as peças do molde.



Figura 10: Parede [11].

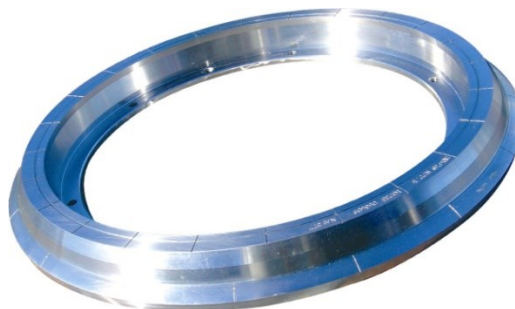


Figura 11: Anel do talão [11].

Como foi explicado anteriormente (capítulo 2.2, página 37) o pneu em “verde” é empurrado contra o molde para tomar a forma final pretendida. Ao ser empurrado há o risco de criar bolhas de ar entre o pneu em “verde” e o molde, o que provocaria imperfeições no pneu. A *Continental AG* patenteou um dispositivo para expulsar o ar criado entre o pneu em “verde” e o molde, sem correr o risco de a borracha sair do molde. Este dispositivo chama-se “eurovent”, ver Figura 12.b, e é colocado dentro de furos existentes no molde (segmentos, paredes e anéis do talão), ver Figura 12.b. Possui uma mola que garante que o orifício esteja aberto até uma determinada pressão, podendo assim o ar sair sem problema. A Figura 13 mostra como todas as peças do molde são montadas.

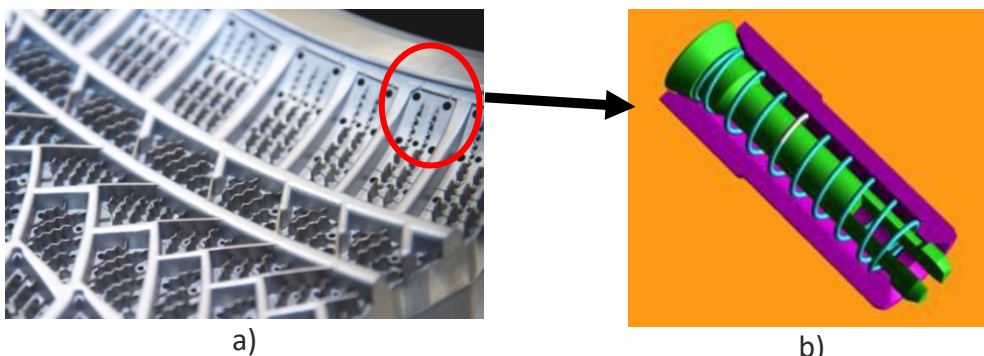
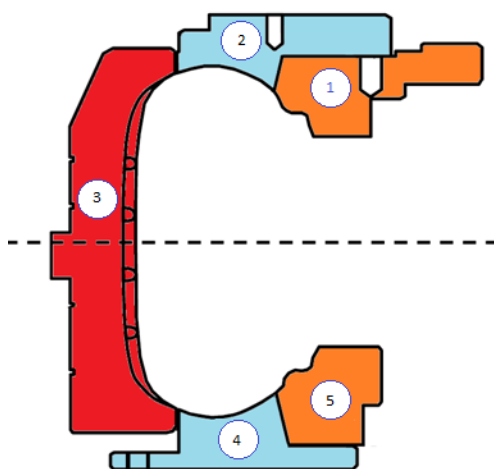


Figura 12: Eurovent dentro da câmara dos eurovents [10]: a) Furos para os eurovents, b) eurovents.



Legenda

- 1. Anel do talão superior;
- 2. Parede superior;
- 3. Segmento;
- 4. Parede inferior;
- 5. Anel de talão inferior.

Figura 13: Vista lateral de um molde montado.

## 2.4 Contentor

Como já foi referido, para ocorrer a vulcanização é necessário fornecer calor ao pneu para se desencadearem as reacções químicas. O contentor, ver Figura 14, é o dispositivo utilizado para fornecer calor necessário ao molde, através de canais existentes no seu interior onde circula vapor; aquece o molde e o pneu, por condução térmica. O calor, no pneu, desencadeia as reacções de vulcanização. O molde é montado na parte interior do contentor com recurso a parafusos de forma a garantir que, quando fechado, todas as peças estejam bem posicionadas de forma a não criar imperfeições no pneu. O contentor também permite grande flexibilidade na produção porque é possível montar diferentes medidas de pneus no mesmo contentor, fazendo com que não seja necessário existir um número de contentores igual ao de moldes. O seu funcionamento é muito simples, tornando a vulcanização num processo relativamente fácil, visto que é possível abrir o contentor com molde montado sempre que necessário.

Na Figura 14, observa-se um molde montado no contentor e fechado, sendo que, as peças com o símbolo # constituem o molde e as peças com um símbolo + representam o contentor. Na Figura 15 está uma vista de corte do contentor fechado e sem molde, com a legenda de cada um dos constituintes do contentor.

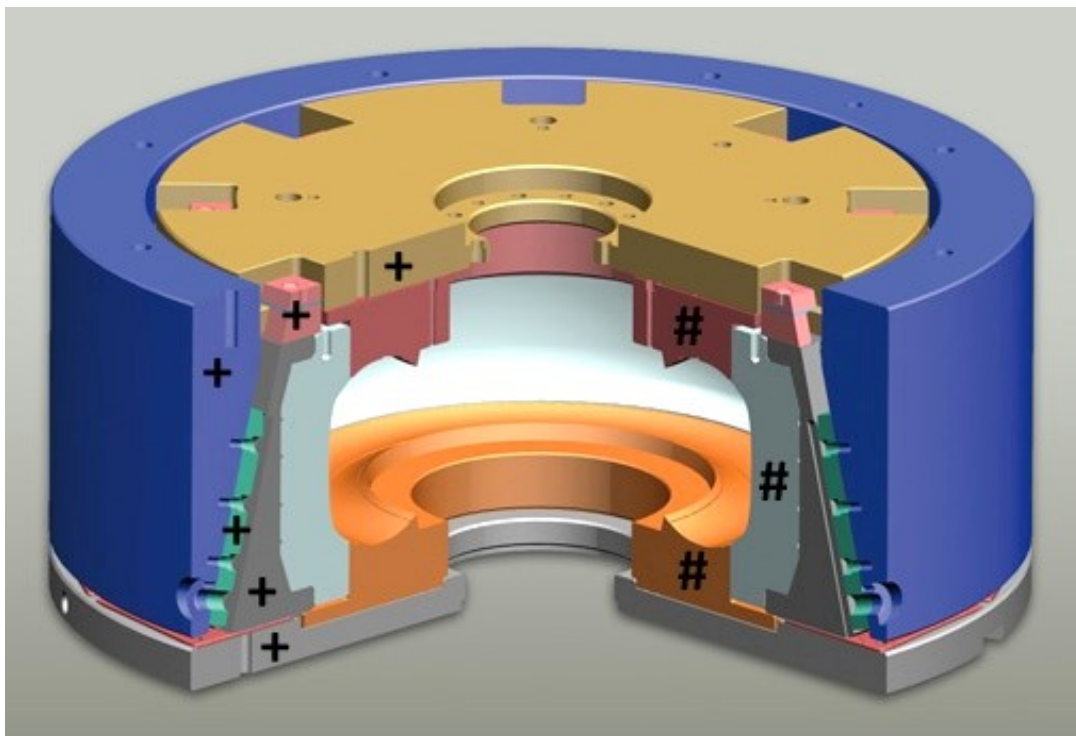
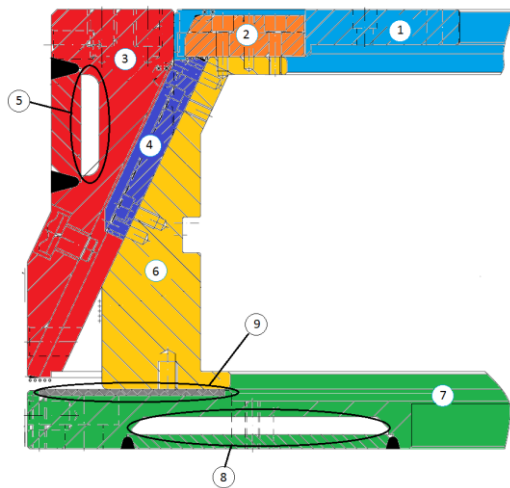


Figura 14: Molde (símbolo #) montado dentro de um contentor (símbolo +) [12].



Legenda

- 1. Placa superior;
- 2. Guias T;
- 3. Cone;
- 4. Guias;
- 5. Câmara de vapor do cone;
- 6. Porta-segmentos;
- 7. Placa inferior;
- 8. Câmara de vapor da placa inferior;
- 9. Placa deslizante.

Figura 15: Peças constituintes do contentor.

Na CMIP existem cerca de 14 tipos de contentores diferentes, mas só oito é que têm uma utilização frequente, sendo eles: EGS, EGU, EGV, EG40, EG43, EGX, G46 e G50. Todos estes modelos têm funcionamento idêntico, sendo que as características que os distinguem são as seguintes:

- Localização e forma da câmara de vapor;
- Capacidade volúmica da câmara de vapor;
- Dimensões e massa.

De forma a compreender as diferenças dimensionais de cada modelo de contentor, a Tabela 3 possui a massa do contentor em vazio e com molde, as capacidades de cada câmara de vapor, diâmetro e altura dos diferentes modelos, por ordem crescente da massa.

Tabela 3: Características técnicas dos contentores.

	EGS	EGU	EG40	EGV	EG43	EGX	G46	G50
<b>Massa sem molde (kg)</b>	825	1015	1050	1225	1475	1850	1970	2285
<b>Massa máxima com molde (kg)</b>	1200	1500	1500	1600	1800	2200	2700	3000
<b>Câmara de vapor no cone (dm<sup>3</sup>)</b>	2,5	3,5	3,6	6,7	12,5	7,6	15,2	18
<b>Câmara de vapor na placa inferior (dm<sup>3</sup>)</b>	4,5	5,2	3,6	5,2	7,5	8	----	----
<b>Altura (mm)</b>	340	370	380	415	437	505	500	500
<b>Diâmetro (mm)</b>	950	1015	1015	1015	1100	1065	1169	1270

Todos os contentores são fabricados em liga de aço 1.0570, estando as características termofísicas deste aço na Tabela 28 do Anexo 3.

Uma característica muito importante e que diferencia em alguns contentores é a existência da câmara de vapor na placa inferior do contentor. Na CMIP existem actualmente dois tipos de contentores que não possuem esta câmara: o contentor G46 e o G50, ver Figura 16.a. Os restantes tipos possuem câmara de vapor na placa inferior do contentor, ver Figura 16.b.

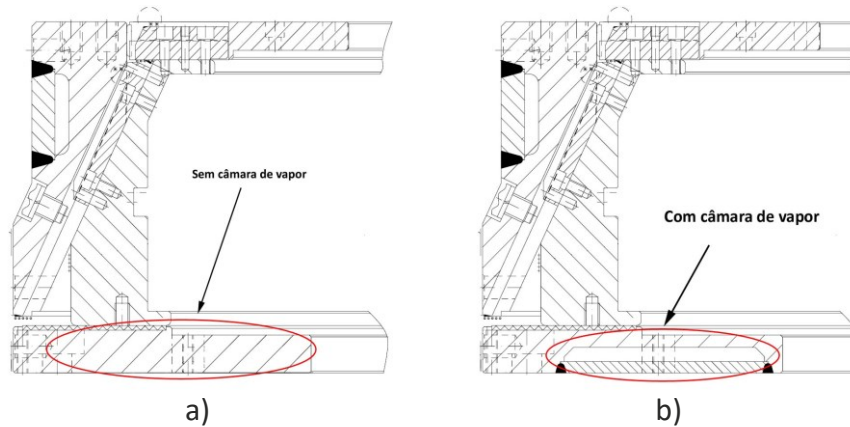


Figura 16: Representação da placa inferior do contentor: a) sem câmara de vapor, b) com câmara de vapor.

O facto de existir contentores com câmara de vapor na placa inferior e outro sem essa mesma placa, deve-se ao tipo de distribuição de calor que cada modelo de pneu necessita para atingir as propriedades desejadas.

Quando um molde é montado no contentor, ambos formam o conjunto molde/contentor (conjunto MC), sendo que, é o contentor que transmite a energia térmica para o molde através das suas câmaras de vapor.

## 2.5 Prensa

Um dos equipamentos que se utilizou durante o estudo foi o sistema de aquecimento de moldes nas prensas. O papel das prensas no processo de fabrico do pneu é o de garantir as condições de pressões externas (pressão sobre o conjunto MC) e internas (pressão no interior do pneu verde) durante a vulcanização, assim como as condições de temperatura necessárias para que a ocorra o processo químico. Na Figura 17.a está uma prensa a vulcanizar. Na Figura 17.b está uma prensa a ser carregada com um pneu em “verde”.



a)



b)

Figura 17: Exemplo de uma prensa: a) cavidade fechada; b) cavidade aberta com um pneu verde para vulcanizar.



Figura 18: Pratos com câmara de vapor.

As cavidades das prensas possuem dois pratos, ver Figura 18, um na parte superior e outro na parte inferior. Cada prato possui uma câmara de vapor, podendo estar ou não ligada à linha de vapor conforme o tipo de contentor que for montado na prensa. Se se montar um contentor com câmara de vapor na placa inferior, o prato inferior não é ligado à linha de vapor, como demonstra a Figura 19.a. No caso de se montar um contentor sem câmara de vapor na placa inferior, o prato inferior é ligado à linha de vapor, como demonstra a Figura 19.b. Já a câmara do prato superior está sempre conectada à linha de vapor de forma a fornecer energia à parte superior do conjunto MC, como demonstra a Figura 19.a e Figura 19.b.

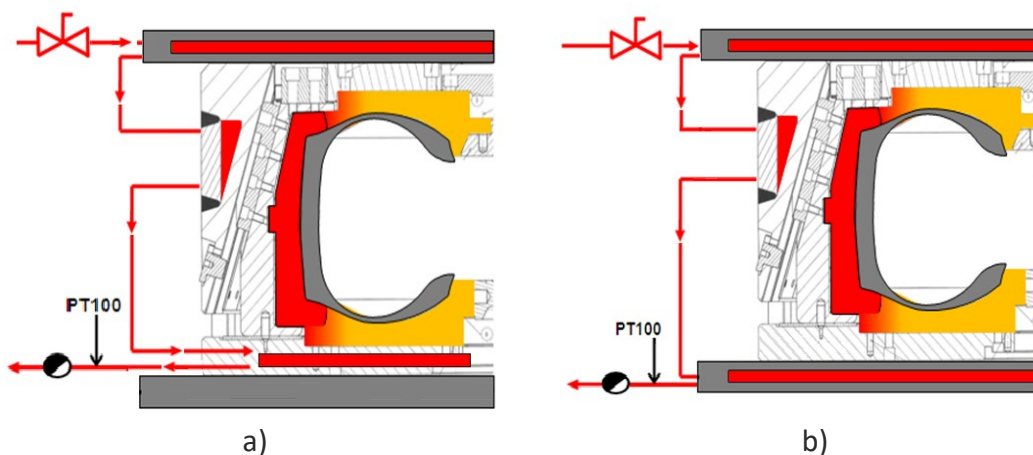


Figura 19: Esquema da ligação entre a linha de vapor e a prensa: a) contentor com câmara de vapor na placa inferior, b) sem câmara de vapor na placa inferior.

De forma a melhorar a capacidade de aquecimento, todas as prensas existentes na CMIP estão equipadas com protectores térmicos. Estes protectores são feitos de lã de rocha e pode ter uma espessura compreendida entres os 25mm e os 50mm de espessura dependendo do modelo da prensa. Esta protecção encontra-se em redor do molde e dos pratos da prensa.

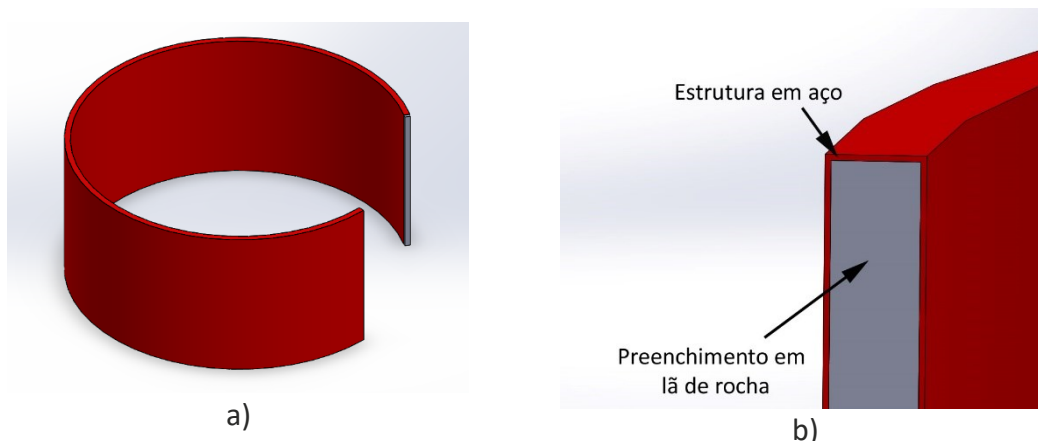


Figura 20: Isolamento térmico utilizado nas prensas: a) visão isométrica, b) vista de pormenor.

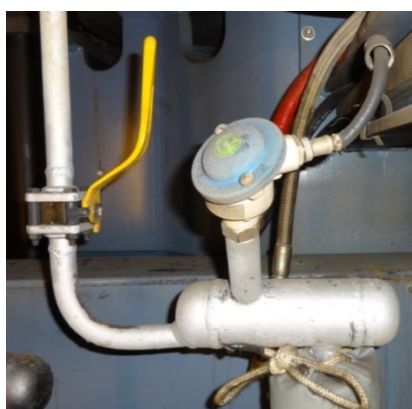
Pode-se observar, na Figura 20.a, uma representação do protector térmico utilizado nas prensas. Na Figura 20.b está uma vista de pormenor do interior do protector térmico,

em que, a cinzento, se representa o enchimento a lã de rocha; a vermelho é a estrutura feita em aço que garante o suporte da lã de rocha na prensa.

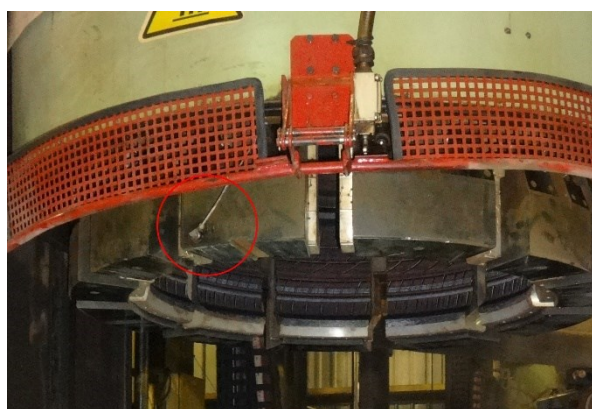
Para controlar a temperatura do molde ( $T_{molde}$ ), as prensas estão equipadas com duas sondas PT100: uma no colectador de vapor à saída da prensa, ver Figura 21.a, e outra num dos segmentos do molde, ver Figura 21.b. Ao fazer a leitura destas duas temperaturas, o sistema vai automaticamente ajustar a percentagem de abertura da válvula de vapor de forma a cumprir os valores pré-definidos de temperatura do molde e do vapor à saída da prensa durante a vulcanização, assim como o aquecimento do molde. O vapor à entrada e saída possui as propriedades físicas que estão na Tabela 4. No anexo 3, a Tabela 29 possui as características termofísicas do fluido térmico.

Tabela 4: Propriedades do vapor na linha à entrada/saída.

<b>Pressão do vapor à entrada</b>	17,5 bar relativos
<b>Estado à entrada</b>	Vapor saturado seco
<b>Estado à saída</b>	Líquido saturado



a)



b)

Figura 21: Instrumentos de medição da temperatura usados na prensa: a) PT100 localizada no colectador de vapor à saída. b) PT100 localizada num dos segmentos (círculo a vermelho).

Quando se monta um conjunto MC na prensa e se quer aquecê-lo, liga-se o modo “aquecimento de moldes”. Este modo é composto por duas fases distintas.

Na primeira fase, designada por “Aquecimento do molde”, o sistema coloca a válvula de vapor 100% aberta, de forma a que seja fornecida a potência térmica máxima ao molde. Este regime é mantido até que a temperatura do molde ( $T_{molde}$ ) seja igual a 165°C. Quando atingida essa temperatura, o sistema regula a válvula de forma a que a temperatura do vapor à saída da prensa ( $T_{vs}$ ) seja entre 170°C e 175°C, activando a 2ª fase: “aquecimento final do molde”. Esta fase tem como objectivo estabilizar a temperatura em todo o molde, e possui uma duração aproximada de 15 minutos.

Passados estes 15 minutos, o molde está pronto para receber os pneus “verdes” e iniciar a produção. Contudo, este modo de aquecimento não é totalmente eficaz, causando imperfeições no pneu devido a uma vulcanização com temperatura do molde abaixo do estipulado. Sendo assim, neste trabalho será estudado este modo de aquecimento para o melhorar.

## 2.6 Mesa de aquecimento

A mesa de aquecimento tem como objectivo pré-aquecer o conjunto molde/contentor (conjunto MC) antes de o montar na prensa, de forma a diminuir o tempo necessário de aquecimento dos conjuntos MC na prensa. Este dispositivo tem manuseamento muito simples. É uma mesa de metal onde os conjuntos MC são colocados numa de 8 posições possíveis, como se pode visualizar na Figura 22.

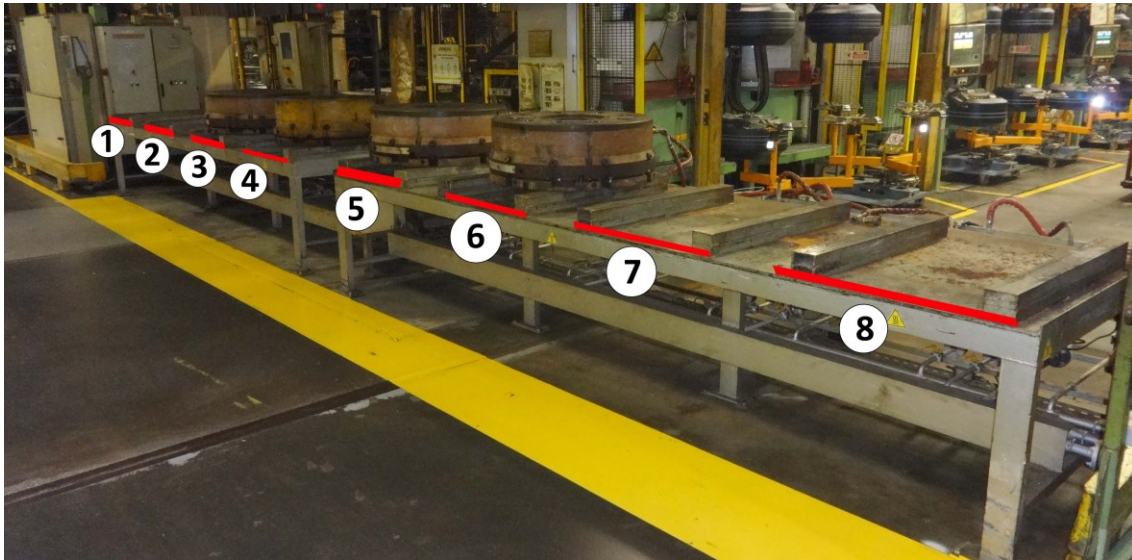


Figura 22: Mesa de aquecimento.

Posteriormente o operador, liga à linha de vapor, através de mangueiras flexíveis metálicas, a entrada e a saída de vapor do cone, ver Figura 23. Estas mangueiras são ligadas no conjunto MC através de encaixes rápidos. Quando realizadas as conexões, é ligado o sistema existente na mesa, que, com duas sondas PT100, uma colocada no molde e outra na saída de vapor do conjunto. O sistema regula a abertura da válvula de vapor de forma a tornar o aquecimento mais eficiente. Actualmente não se coloca a sonda PT100 no molde, pelo que a temperatura lida na sonda é a temperatura ambiente. Ao acontecer isto, o sistema vai ter sempre a válvula de vapor aberta a 100%. As propriedades de vapor neste dispositivo são idênticas às que existem nas prensas, ver Tabela 4, página 47.

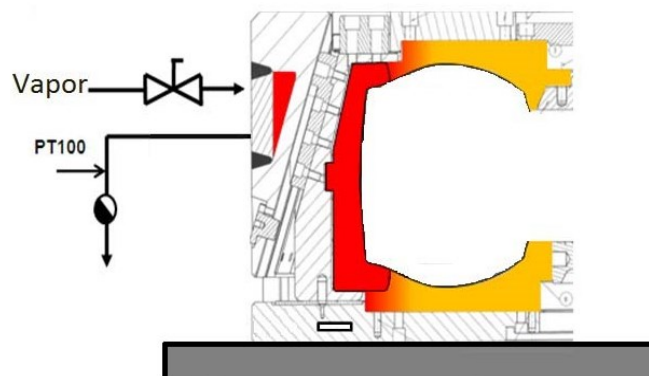


Figura 23: Ligações de vapor entre o conjunto MC e a mesa de aquecimento.

Não existe nenhuma protecção térmica neste dispositivo, pelo que o conjunto MC está bastante exposto às condições térmicas do espaço. Isto favorece perdas térmicas por convecção (circulação de carrinhos com pneus em “verde”, condutas de ar novo, circulação de pessoas) e por radiação.

Próximo da mesa de aquecimento está localizada uma conduta de insuflação de ar novo para que o ar interior seja renovado. Esta conduta contribui para aumentar as perdas por convecção forçada do conjunto MC.



Figura 24: Localização da conduta em relação à mesa de aquecimento.

Neste estudo a mesa de aquecimento também vai ser alvo de medições, de forma a serem encontradas soluções de melhoria.



# 3. BASE TEÓRICA

3.1 Sensor termoelétrico- Termopar

3.2 Transferência de calor

3.3 Métodos numéricos



### 3 BASE TEÓRICA

Em seguida trata-se, sumariamente, dos conceitos teóricos usados para realizar os ensaios laboratoriais.

Inicia-se pelo dispositivo usado para as medições de temperatura no MC, os termopares. De seguida é feito um tratamento teórico das medições usando-se conceitos em transferência de calor, fazendo-se assim, um sumário dos conceitos de transferência de calor.

Por fim, usou-se o método dos mínimos quadrados para obter as correlações de  $dT/dt$  para as peças constituintes do MC.

#### 3.1 Sensor termoeléctrico- Termopar

Para medir a temperatura em diferentes pontos do molde, recorreu-se a sensores termoeléctricos designados por termopares. São constituídos por dois fios de metais diferentes (ou ligas) ligados através de uma união que pode ser soldada ou não, e têm como princípio físico o efeito de Seebeck.

O efeito Seebeck foi descoberto por Thomas Johann Seebeck em 1821 e consiste no aparecimento de uma força electromotriz (f.e.m) quando um circuito eléctrico, composto por dois condutores diferentes (metal A e metal B), é sujeito a uma diferença de temperatura ( $T_1$  e  $T_2$ ) [13]. Na Figura 25 está demonstrado o esquema básico do funcionamento de um termopar.

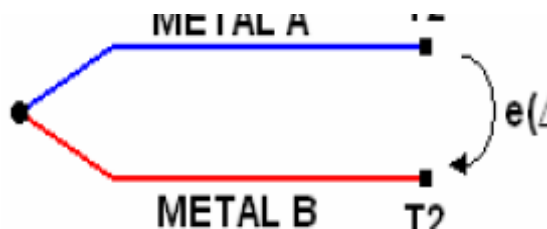


Figura 25: Princípio de funcionamento de um termopar [14].

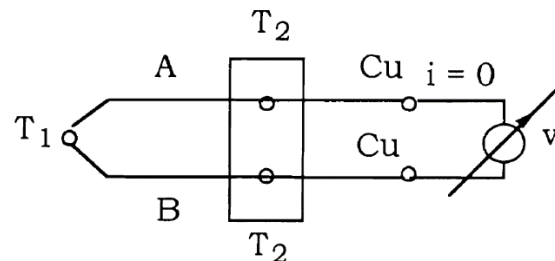


Figura 26: Medição da f.e.m criada [14].

Esta f.e.m é medida em circuito aberto ( $i=0$ ) de forma a garantir que não haja aquecimento ou arrefecimento do termopar devido aos efeitos de *Thomson* (troca de calor no par dos metais) ou *Peltier* (troca de calor na junção dos metais). Desta forma garante-se que a temperatura da junção é a temperatura que se pretende medir.

Como os termopares se baseiam no efeito de Seebeck é colocada, uma das junções, no local onde se pretende medir a temperatura ( $T_1$ ), enquanto a outra junção ( $T_2$ ) é mantida a temperatura constante (temperatura de referência), havendo uma diferença de temperaturas que originará uma f.e.m. A temperatura de referência é uma temperatura conhecida em todas as medições. Esta temperatura pode ser mantida com gelo fundido ( $T=0^\circ\text{C}$ ), ou com recurso de sistemas artificiais de controlo de temperatura de forma a ter junção de referência estável [15].

Na Figura 26 está representado um esquema em que se mede a f.e.m existente entre T1 e T2 com o recurso a um voltímetro. Este aparelho vai fornecer o valor do f.e.m, em milivolts, mV, produzido pela diferença de temperatura. Este valor é depois comparado com base em tabelas ou curvas fornecidas pelos fabricantes para uma temperatura de referência de 0°C. No mercado existem vários tipos de termopares construídos para diferentes gamas de temperaturas. Na Tabela 5 estão os diferentes tipos de termopares com as respectivas gamas em que se devem utilizar [16].

Tabela 5: Tipos de termopares [16].

Tipo	Material		Intervalo de funcionamento (°C)		Intervalo de funcionamento (mV)	
	Positivo	Negativo	Min (°C)	Máx (°C)	Min (mV)	Máx (mV)
J	Fe	Liga Cu-Ni	-210	1200	-8,095	69,553
K	Liga Ni-Cr	Liga Ni-Al	-270	1372	-6,458	54,886
T	Cu	Liga Cu-Ni	-270	400	-6,258	20,872
E	Liga Ni-Cr	Liga Cu-Ni	-270	1000	-9,835	76,373
N	Liga Ni-Cr-Si	Liga Ni-Si-Mg	-270	1300	-4,345	47,513
R	Liga Pt 13%-Rh	Pt	-50	1768	-0,226	21,101
S	Liga Pt 10%-Rh	Pt	-50	1768	-0,236	18,693
U	Cu	Liga Cu-Ni	----	----	----	----
B	Liga Pt 30%-Rh	Liga Pt 6%-Rh	0	1820	0	13,82

Neste projecto utilizaram-se termopares do tipo J com isolamento em *Neoflon* devido a serem os utilizados em testes na CMIP.

### 3.2 Transferência de calor

A transferência de calor é a troca de energia (calor) entre dois ou mais meios que se encontram a temperaturas diferentes [17], ver Figura 27, sendo este fluxo na direcção do meio mais quente para o mais frio.

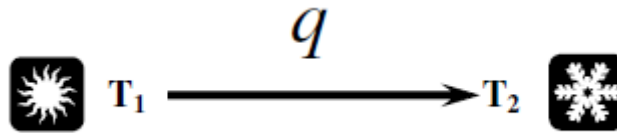


Figura 27: Troca de energia entre dois meios [17].

Quando existe um gradiente de temperatura num meio, as trocas de calor podem dar-se através de vários mecanismos. Se a troca de calor se der num meio sem movimento macroscópico, tanto sólido como líquido, é usado o termo *condução*, ver Figura 28.a, para referir a transferência de calor que ocorre através desse meio. O termo *convecção*, ver Figura 28.b, é usado quando ocorre transferência de calor entre um fluido, parado ou em movimento, sobre uma superfície parada ou em movimento, a diferentes temperaturas. O terceiro mecanismo de troca de calor é a *radiação térmica*, ver Figura 28.c. Este mecanismo ocorre entre superfícies com temperatura acima do zero absoluto, visto que estas emitem e reflectem energia em forma de ondas electromagnéticas.

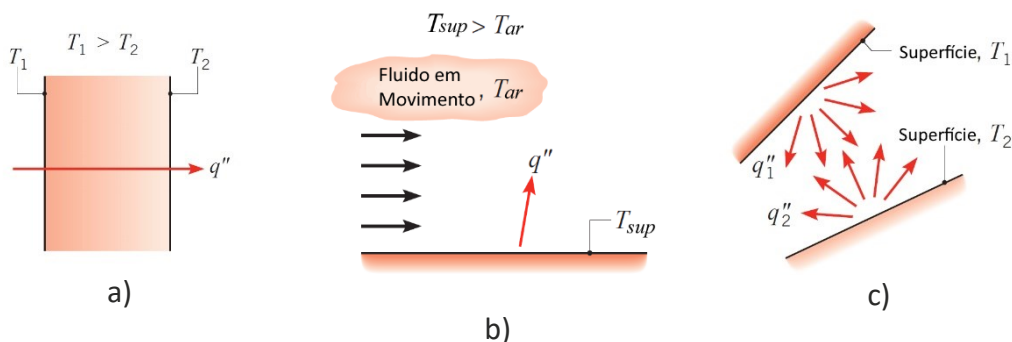


Figura 28: Mecanismos de transferência de calor: a) condução, b) convecção, c) radiação [18].

Nos tópicos seguintes, descrever-se-ão estes mecanismos de forma a entender os fenómenos e a quantificar a energia que é transferida por unidade de tempo [18].

#### 3.2.1 Condução

A condução é o "transporte molecular de calor através de um meio sólido ou em repouso" [17]. Este mecanismo de transporte de calor ocorre a nível molecular, em que as diferenças de temperatura provocam a agitação das moléculas. Esta agitação, vai-se propagar ao longo do corpo, das moléculas com maior energia (temperatura mais elevada) para as moléculas com menor energia (temperatura mais baixa). A condução de calor é mais rápida nos materiais com elevada condutibilidade térmica.

Para este estudo interessa a equação geral da condução em coordenadas cilíndricas. Considera-se um determinado volume elementar num dado meio onde a temperatura é variável, ver Figura 29.

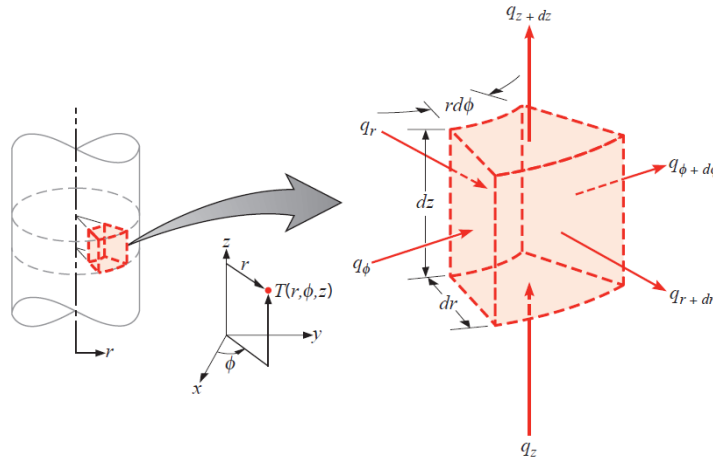


Figura 29: Elemento de volume para dedução da equação de calor em coordenadas cilíndricas [18].

Sabe-se da primeira lei da termodinâmica, equação (1), que “o aumento da quantidade de energia acumulada (armazenada) em um volume deve ser igual à quantidade de energia que entra no volume de controlo menos a quantidade de energia que deixa o volume de controlo mais a quantidade de energia gerada no volume de controlo”[18], ver Figura 30.

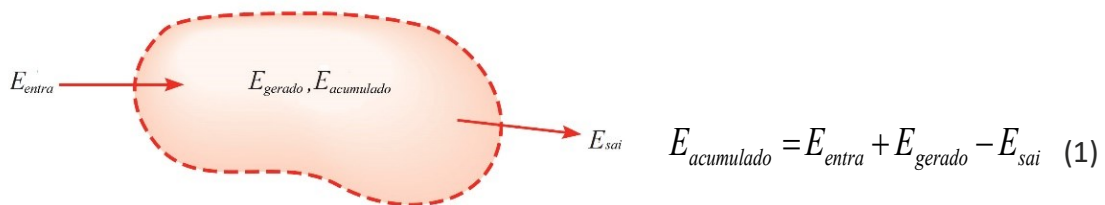


Figura 30: Conservação da energia num volume de controlo num instante [18].

Aplicando este balanço de energia ao volume elementar da Figura 29, tem-se a equação diferencial da condução de calor tridimensional.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( k \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

A equação (2) é para materiais isotrópicos ( $k=k_r=k_\theta=k_z$ ).

A utilização das coordenadas cilíndricas na equação de calor deve-se à forma cilíndrica que o conjunto MC possui, ver Figura 14, página 42. Com este sistema de coordenadas obtêm-se uma melhor descrição da forma de como o fluxo de calor evolui no conjunto MC, ver Figura 31.

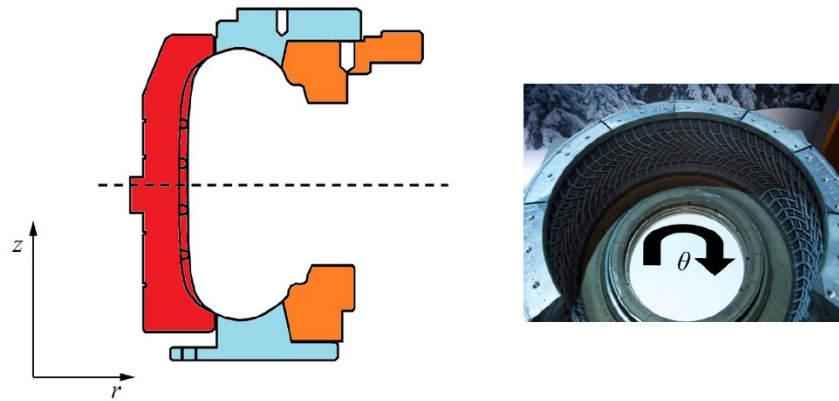


Figura 31: Componentes cilíndricas no conjunto MC

A componente  $r$  diz respeito à evolução da temperatura ao longo da espessura do conjunto MC. É segundo esta componente que se irá verificar se existe resistência de contacto entre as várias peças do molde (segmentos, paredes e anéis).

A componente  $\theta$  descreve a evolução da temperatura à volta do conjunto MC. É segundo esta componente que irá se analisar se existe uma grande, ou pequena, resistência de contacto entre os segmentos

A componente  $z$  já diz respeito à evolução da temperatura ao longo da altura do conjunto MC. É através desta componente que se irá verificar, com dados experimentais, se existe grande resistência de contacto entre as placas da prensa e o conjunto MC.

Contudo, equação diferencial da condução é de uma resolução complexa e difícil, pelo que há um enorme interesse em simplificá-la de forma a responder ao objectivo deste trabalho: estudar o aquecimento do conjunto MC.

A parcela  $\partial T / \partial t$  diz respeito à evolução da temperatura ao longo do tempo do conjunto MC. Se esta parcela for igual a zero ( $\partial T / \partial t = 0$ ) quer dizer que o regime é permanente. Mas isto não é o que acontece no conjunto MC, visto que este é aquecido até à temperatura ideal de vulcanização. Esta evolução da temperatura do conjunto MC é o propósito do estudo.

Já as parcelas  $\partial T / \partial r$ ,  $\partial T / \partial \theta$  e  $\partial T / \partial z$  poderão ser ou não importantes no aquecimento do conjunto MC, pelo que fica esta questão.

Para responder a isto colocaram-se termopares em diferentes pontos do MC, e viram-se as temperaturas nesses pontos ao longo do tempo  $t$  de aquecimento.

### 3.2.2 Convecção

A convecção é a transferência de calor entre uma superfície e um fluido. A transferência de calor por convecção é classificada a partir do tipo de movimento do fluido. Se o movimento do fluido for forçado por um ventilador, bomba, movimento de veículos ou outro sistema, diz-se que é convecção forçada, ver Figura 32.a. No caso de o movimento do fluido ser provocado pela diferença de densidades (provocada pela diferença de temperatura do fluido) desse mesmo fluido, diz-se que a convecção é natural, ver Figura 32.b [17].

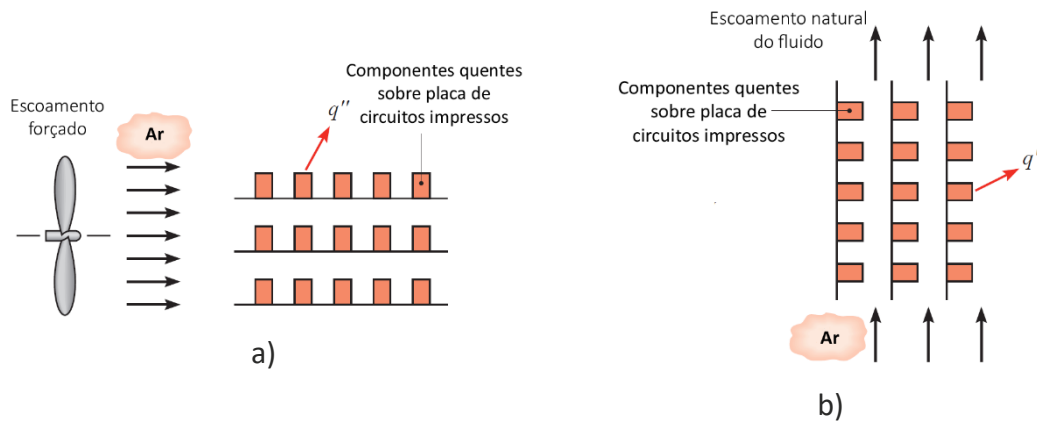


Figura 32: Transferência de calor por convecção [18]: a) forçada, b) natural.

Independentemente da natureza do tipo de movimento do fluido, a equação do fluxo de calor por convecção é dada por

$$q''_x = h_{conv} \cdot (T_{sup} - T_{\infty}) \quad (3)$$

em que  $q''_x$ , fluxo de calor por convecção ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), é proporcional à diferença de temperaturas entre a superfície e o fluido. Esta expressão é conhecida como a Lei de *Newton* do arrefecimento e o  $h_{conv}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) é o coeficiente de convecção de um escoamento. Este coeficiente depende do movimento, das propriedades termofísicas do fluido e da geometria da superfície. A Tabela 6 possui alguns valores típicos para diferentes tipos de convecção [18].

Tabela 6: Valores típicos para o coeficiente de convecção [18].

Processo		$h_{conv}$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )
Convecção natural	Gases	2 – 25
	Líquidos	50 – 1000
Convecção forçada	Gases	25 – 250
	Líquidos	100 – 20000

Este mecanismo de transferência de calor existe entre o conjunto MC e o ar da envolvente quando o aquecimento é feito na mesa de aquecimento. No caso do aquecimento do conjunto MC realizar-se na prensa, há convecção entre o ar existente no interior da prensa e as peças interiores do conjunto MC.

### 3.2.3 Radiação

A radiação térmica é outro meio de transporte de energia térmica, mas com a particularidade de não ser necessário um meio para se propagar, sendo que, é mais eficiente quando é transmitida em vácuo. Todos os corpos que estejam acima dos 0 K emitem radiação térmica [18]. O corpo negro é um conceito de corpo ideal, que tem as seguintes características:

- Absorve toda a radiação que nele incide;
- Emite o máximo de energia;
- A radiação que emite só depende da temperatura e do comprimento de onda ( $\lambda$ ).

Para cálculo do poder emissivo total e hemisférico de um corpo negro ( $E_b$ ) é utilizada a lei de *Stephan-Boltzmann*

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (4)$$

em que  $T_s$  é a temperatura absoluta (K) da superfície do corpo negro e  $\sigma$  é a constante de *Stephan-Boltzmann* ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ) [18]. Na realidade não existe nenhuma superfície que emita tanta radiação como um corpo negro à mesma temperatura. Sendo assim, é feita uma comparação entre estes dois corpos de forma a avaliar a eficiência do corpo real relativamente ao corpo negro. Chama-se emissibilidade hemisférica total ( $\varepsilon$ )

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (5)$$

Juntando a equação (4) e (5), tem-se a equação para calcular a potência calorífica da superfície real por unidade de área ( $\text{W.m}^{-2}$ )

$$E = q'' = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (6)$$

Se houver necessidade de calcular o calor trocado entre duas superfícies, uma com área muito maior que a outra, então a potência calorífica (W) é dada por

$$q'' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1 - T_2) \quad (7)$$

Esta transferência de calor ocorre em duas situações: aquecimento na mesa de aquecimento, ver Figura 33.b, onde estão representados os fluxos de radiação, e no aquecimento na prensa, ver Figura 33.a, onde também estão representados estes fluxos.

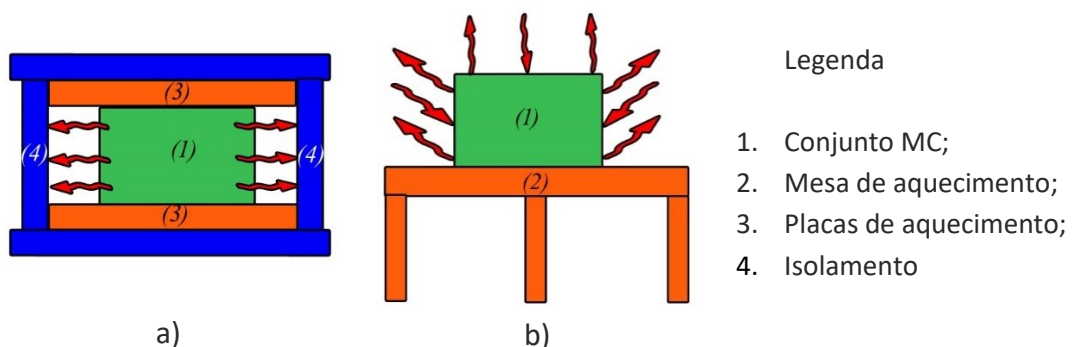


Figura 33: Troca de calor por radiação na: a) prensa, b) mesa de aquecimento.

### 3.2.4 Resistência de contacto

Quando estão diferentes materiais em contacto, pode haver uma queda de temperatura entre as superfícies dos materiais. Isto deve-se a existir uma resistência entre as duas faces, a que se dá o nome de resistência de contacto,  $R''_{cont}$  ( $m^2.K.W^{-1}$ ) [17]. É calculada na seguinte forma:

$$R''_{cont} = \frac{T_A - T_B}{q''_x} \quad (8)$$

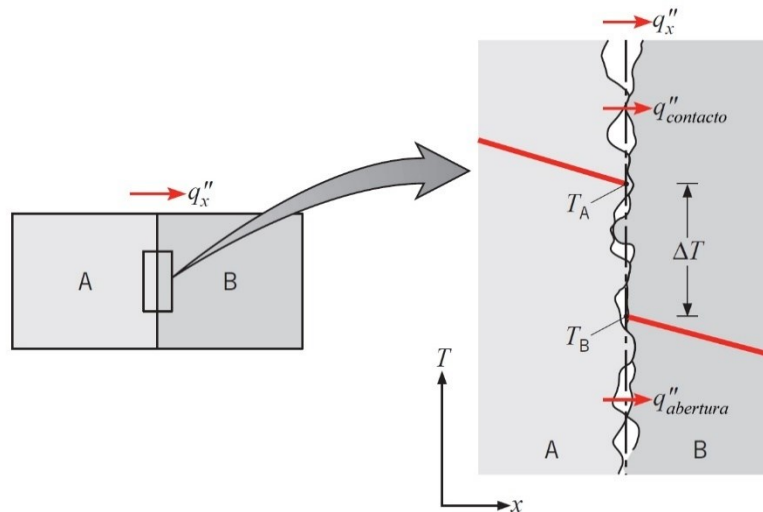


Figura 34: Representação da queda da temperatura entre duas superfícies [18].

Esta resistência é causada essencialmente pela rugosidade dos materiais. Essa rugosidade cria bolsas de ar na interface das superfícies; a condutibilidade do ar é baixa, ver Figura 34. A resistência de contacto aumenta quanto maior for a rugosidade e menor for a área de contacto entre as peças.

Para diminuir esta resistência térmica pode-se polir as superfícies dos materiais de forma a diminuir a rugosidade dos materiais, ou então, aplicar pressão de contacto sobre os dois materiais de forma a eliminar as bolsas de ar e assim diminuir a resistência de contacto. Na Tabela 7 estão diferentes valores da resistência de contacto para diferentes pressões de contacto em condições de vácuo. Entre as diferentes peças do conjunto MC há resistência de contacto, devido à existência de resíduos e assim como, às peças não estarem bem encostadas umas com as outras.

Tabela 7: Valores da resistência de contacto para diferentes pressões de contacto ( $R''_x \cdot 10^4$ ) ( $m^2.K.W^{-1}$ ).

Material	Pressão de contacto	
	100 $kN.m^{-2}$	10000 $kN.m^{-2}$
Aço Inoxidável	6 - 25	0,7 - 4,0
Cobre	1 - 10	0,1 - 0,5
Magnésio	1,5 - 3,5	0,2 - 0,4
Alumínio	1,5 - 5,0	0,2 - 0,4

### 3.3 Métodos numéricos

#### 3.3.1 Runge-Kutta de 4º ordem [19]

O aquecimento de cada uma das peças do conjunto MC será descrito com equações diferenciais, ver equação (9).

$$\frac{dT}{dt} = f(t, T) \quad (9)$$

Estas equações são equações diferenciais ordinárias (EDO). Para resolver numericamente este tipo de equação é utilizado um método de passo único, que tem como fórmula geral a seguinte

$$T(t + \Delta t) = T(t) + f'(t, T) \cdot \Delta t \quad (10)$$

em que  $f'(t, T)$  é a derivada em  $t$  usada para obter  $T(t + \Delta t)$  a partir de um valor anterior  $T(t)$ . O  $\Delta t$  é o passo de integração, ver Figura 35.

O que diferencia os vários métodos de passo único é a forma de como é calculada a estimativa da derivada. Se utilizar o método de Euler, a derivada inicial é calculada como uma inclinação média em todo o passo. Já os métodos de Runge-Kutta são métodos onde se desenvolvem várias estimativas da inclinação até se encontrar uma inclinação média melhorada para um dado passo.

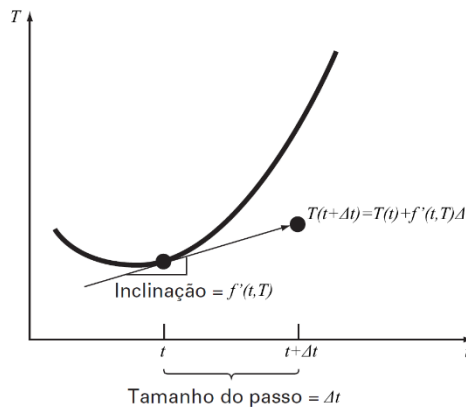


Figura 35: Descrição gráfica do método de Runge-Kutta [19].

Para este projecto utiliza-se o método de Runge-Kutta de quarta ordem. A forma geral deste método é a seguinte:

$$T(t + \Delta t) = T(t) + \frac{1}{6} \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \cdot \Delta t \quad (11)$$

em que

$$k_1 = f(t, T) \quad (12)$$

$$k_2 = f\left(t + \frac{1}{2}\Delta t, T + \frac{1}{2}k_1\Delta t\right) \quad (13)$$

$$k_3 = f\left(t + \frac{1}{2}\Delta t, T + \frac{1}{2}k_2\Delta t\right) \quad (14)$$

$$k_4 = f(t + \Delta t, T + k_3\Delta t) \quad (15)$$

Para entender como é que “funciona” o método de Runge-Kutta, a Figura 36 demonstra o significado dos  $k$ 's e do  $\Delta t$ . Os  $k$ 's representam a inclinação da recta enquanto o  $\Delta t$  representa o passo. Sendo assim a equação (11) é a média ponderada das inclinações para obter uma inclinação melhorada, [19].

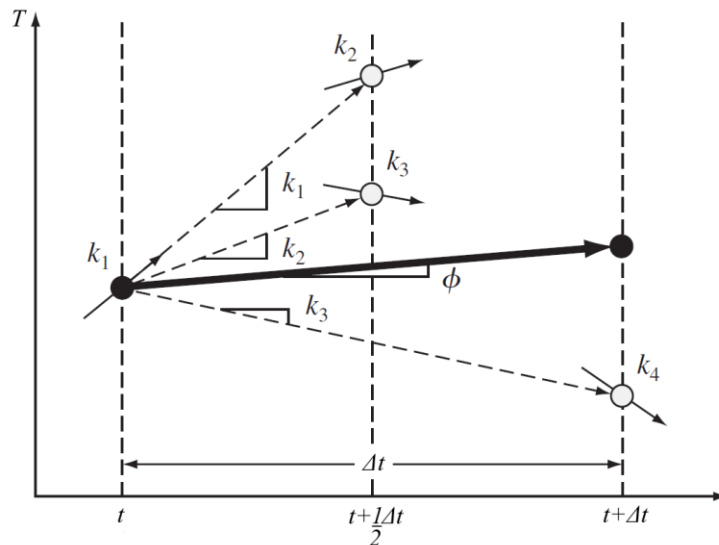


Figura 36: Descrição gráfica das estimativas de inclinação envolvidas no método de Runge-Kutta de quarta ordem [19].

### 3.3.2 Regressão por mínimos quadrados [19]

No caso do conjunto MC aquecer uniformemente tem-se que a temperatura em todos os pontos do conjunto MC é a mesma para dado tempo  $t$  durante o processo de aquecimento. Se o conjunto MC aquece uniformemente é o que será determinado com os gráficos de temperaturas, em função do tempo, que ocorrem nos vários pontos do MC ao longo do tempo.

Já antes dos ensaios era previsível que o aquecimento do MC não fosse uniforme. Contudo, também se esperava que cada uma das peças constituintes do MC aquecesse uniformemente. Mas isso só poderia ser comprovado por análise dos resultados dos ensaios. Em resumo, se não fosse possível determinar uma expressão  $T \equiv T(t)$  para todos os pontos do MC, esperava-se que uma expressão  $T \equiv T(t)$  fosse aplicável a cada uma das peças do MC.

O método dos mínimos quadrados foi usado para achar o polinómio que melhor traduzisse a evolução da temperatura  $T$  com o tempo  $t$  ao longo do aquecimento de cada peça do MC.

Para isso usar-se-á a 1ª lei da termodinâmica, equação (16). Esta lei vai ser trabalhada de forma a se obter  $dT/dt$ , a partir da seguinte forma

$$E_{acumulado} = \frac{dE_{acumulado}}{dt} = E_{entra} - E_{sai} + E_{gerado} \quad (16)$$

A energia acumulada, para dada peça do MC, é dada por

$$E_{acumulado} = m_{peça} c_{peça} \Delta T = m_{peça} c_{peça} (T(t)_{peça} - T_{inicial}) \quad (17)$$

em que  $c$  é o calor específico ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ) de uma dada peça do MC. A potência térmica acumulada pela peça é

$$\dot{E} = m_{peça} \cdot c_{peça} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (18)$$

onde  $dT/dt$  representa a taxa com que a temperatura evolui ao longo do tempo. A energia que entra no sistema é fornecida por vapor de água, que entra no contentor como vapor saturado seco e sai como líquido saturado. Isto significa que é fornecido calor latente pelo vapor ao MC. Logo a expressão utilizada para calcular a potência térmica entra no MC é:

$$\dot{E} = \dot{m} \cdot \Delta h \quad (19)$$

onde  $\Delta h$  é a variação da entalpia ( $J.kg^{-1}$ ) durante a condensação do vapor.

Neste sistema não existe geração de calor, pelo que esta parcela da equação (16),  $E_{gerado}$ , é igual a zero.

Para calcular a energia que sai de cada peça do MC, recorre-se a um balanço energético, como se pode observar na Figura 37. A energia que entra não é totalmente armazenada pelo sistema; há perdas térmicas indicadas pela Figura 37. Sendo assim, a equação de potência térmica perdida por radiação e convecção para uma dada peça do MC é dada pela equação (20).

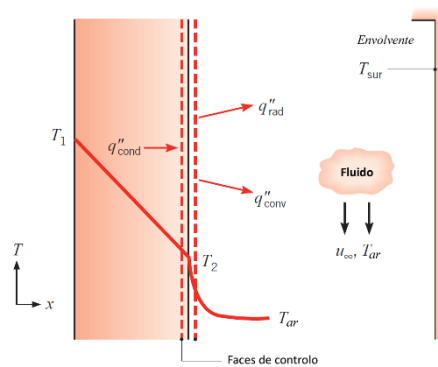


Figura 37: Balanço de energia por conservação da energia de uma superfície para o meio [18].

$$\dot{E} = \epsilon_{peça} \cdot \sigma \cdot A_{sup\_peça} \cdot [T_{peça}^4(t) - T_{sup}^4] + h_{ar} \cdot A_{sup\_peça} \cdot [T_{peça}(t) - T_{ar}] \quad (20)$$

em que  $\epsilon_{peça}$  é a emissibilidade total hemisférica da peça,  $A_{sup\_peça}$  é a área da superfície exposta à radiação e convecção,  $T_{sup}$  é a temperatura superficial das superfícies envolventes onde está a ocorrer o aquecimento do MC.

Substituindo as equações (18), (19) e (20) na equação (16) tem-se:

$$m_{peça} \cdot c_{peça} \cdot \frac{dT_{peça}}{dt} = \zeta_{peça} \cdot i - \left\{ \varepsilon_{peça} \cdot \sigma \cdot A_{sup\_peça} \cdot [T_{peça}^4(t) - T_{sup}^4] + h \cdot A_{sup\_peça} \cdot [T_{peça}(t) - T_{ar}] \right\} \quad (21)$$

O símbolo  $\zeta_{peça}$  representa a fracção da potência calorífica que entra no MC, ver equação (19), e que entra na peça em causa.

Após simplificações e rearranjos, obtém-se

$$\frac{dT_{peça}}{dt} = \frac{\zeta_{peça} i}{m_{peça} c_{peça}} + \frac{\varepsilon_{peça} \sigma A_{sup\_peça} T_{sup}^4}{m_{peça} c_{peça}} + \frac{h A_{sup\_peça} T_{ar}}{m_{peça} c_{peça}} - \frac{\varepsilon_{peça} \sigma A_{sup\_peça} T_{peça}^4(t)}{m_{peça} c_{peça}} - \frac{h A_{sup\_peça} T_{peça}(t)}{m_{peça} c_{peça}} \quad (22)$$

Por inspeção de (22) nota-se que que  $dT_{peça}/dt$  vai ser um polinómio da forma

$$\frac{dT_{peça}}{dt} = A_{peça} - B_{peça} \cdot T_{peça}(t) - C_{peça} \cdot T_{peça}^4(t) \quad (23)$$

em que  $dT_{peça}/dt$  é dado em  $K \cdot s^{-1}$ . As expressões para  $A$ ,  $B$  e  $C$  são dadas por

$$A = \frac{\zeta_{peça} i}{m_{peça} c_{peça}} + \frac{h A_{sup\_peça} T_{ar}}{m_{peça} c_{peça}} + \frac{\varepsilon_{peça} \sigma A_{sup\_peça} T_{sup}^4}{m_{peça} c_{peça}} \quad (24)$$

$$B = \frac{h \cdot A_{sup\_peça}}{m_{peça} c_{peça}} \quad (25)$$

$$C = \frac{\varepsilon_{peça} \sigma A_{sup\_peça}}{m_{peça} c_{peça}} \quad (26)$$

Para determinar os valores de  $A$ ,  $B$  e  $C$ , recorreu-se ao método da soma dos mínimos quadrado, utilizando uma estratégia de minimizar a soma dos quadrados dos resíduos entre o  $dT/dt_{i,medido}$  e o  $dT/dt_{i,modelo}$ , equação (27).

$$S_r = \sum_{i=1}^n \left\{ \left. \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \right|_{i,medido} - \left. \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \right|_{i,modelo} \right\}^2 \quad (27)$$

$$= \sum_{i=1}^n \left\{ \left. \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \right|_{i,medido} - \left[ A_{peça} - B_{peça} T(t_i)_n - C_{peça} T^4(t_i) \right] \right\}^2$$

Para determinar os coeficientes  $A$ ,  $B$  e  $C$  da equação (27), calcula-se  $\partial S/\partial A$ ,  $\partial S/\partial B$  e  $\partial S/\partial C$ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial A} &= -2 \sum_{n=1}^N \left[ \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \Big|_{medido} - A_{peça} + B_{peça} T_{peça}(t_i) + C_{peça} T_{peça}^4(t_i) \right] \\ \frac{\partial S}{\partial B} &= 2 \sum_{n=1}^N \left[ \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \Big|_{medido} - A_{peça} + B_{peça} T_{peça}(t_i) + C_{peça} T_{peça}^4(t_i) \right] \cdot T_{peça}(t_i) \quad (28) \\ \frac{\partial S}{\partial C} &= 2 \sum_{n=1}^N \left[ \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \Big|_{medido} - A_{peça} + B_{peça} T_{peça}(t_i) + C_{peça} T_{peça}^4(t_i) \right] \cdot T_{peça}^4(t_i) \end{aligned}$$

As expressões de  $\partial S/\partial A$ ,  $\partial S/\partial B$  e  $\partial S/\partial C$  têm de ser igualadas a zero de modo a determinar-se os valores de  $A$ ,  $B$  e  $C$  que tornam mínimo o erro expressado pela equação (27). Após arranjo algébrico obtém-se o seguinte sistema:

$$nA - \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}(t_i) \right) \cdot B - \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^4(t_i) \right) \cdot C = \left( \sum_{i=1}^n \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \Big|_{medido} \right) \quad (29)$$

$$-\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}(t_i) \right) \cdot A + \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^2(t_i) \right) \cdot B + \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^5(t_i) \right) \cdot C = - \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}(t_i) \cdot \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \Big|_{medido} \right) \quad (30)$$

$$-\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^4(t_i) \right) \cdot A + \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^5(t_i) \right) \cdot B + \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^8(t_i) \right) \cdot C = - \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^4(t_i) \cdot \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \Big|_{medido} \right) \quad (31)$$

Observa-se que o conjunto de equações - equação (29), equação (30) e equação (31) - sobre este estudo, constituem um conjunto de equações lineares que são equivalentes à equação matricial  $A \cdot X = B$ , sendo:

$$A = \begin{bmatrix} nA & -\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}(t_i) \right) & -\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^4(t_i) \right) \\ -\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}(t_i) \right) & \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^2(t_i) \right) & \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^5(t_i) \right) \\ -\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^4(t_i) \right) & \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^5(t_i) \right) & \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^8(t_i) \right) \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \quad e \quad B = \begin{bmatrix} \left( \sum_{i=1}^n \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \Big|_{medido} \right) \\ -\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}(t_i) \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \Big|_{medido} \right) \\ -\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^4(t_i) \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \Big|_{medido} \right) \end{bmatrix}$$

Para calcular o valor das incógnitas, reescreve-se a equação matricial, tomando a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nA & -\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}(t_i) \right) & -\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^4(t_i) \right) \\ -\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}(t_i) \right) & \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^2(t_i) \right) & \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^5(t_i) \right) \\ -\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^4(t_i) \right) & \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^5(t_i) \right) & \left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^8(t_i) \right) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \left( \sum_{i=1}^n \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \Big|_{medido} \right) \\ -\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}(t_i) \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \Big|_{medido} \right) \\ -\left( \sum_{i=1}^n T_{peça}^4(t_i) \frac{dT_{peça}(t_i)}{dt} \Big|_{medido} \right) \end{bmatrix} \quad (32)$$

Utilizando a ferramenta de cálculo *EXCEL*, obtêm-se os valores das incógnitas  $A$ ,  $B$  e  $C$  para as diferentes peças do molde em cada contentor e medida escolhida para os testes, que está explícito no capítulo 4.4, página 99. De forma a compreender se o ajuste da curva aos valores experimentais é bom ou não, calculou-se juntamente o desvio padrão ( $S_{y/x}$ ), o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e de correlação ( $r$ ). O cálculo do desvio padrão é feito com recurso à equação (33)

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{S_r}{n - (m + 1)}} \quad (33)$$

Onde  $S_r$  é a soma dos quadrados dos resíduos entre os pontos medidos e os calculados,  $n$  o número de pontos e  $m$  é o grau do polinómio, neste caso  $m=4$ .

A equação (34) diz respeito ao cálculo do coeficiente de determinação

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (34)$$

Onde  $S_t$  é a soma total dos quadrados dos resíduos entre os pontos dados e a média aritmética [19], ou

$$S_t = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (35)$$

Sendo  $\bar{y}$  a média aritmética da amostra.

Para calcular o coeficiente de correlação, recorre-se à equação (36).

$$r = \sqrt{r^2} \quad (36)$$

O ajuste da curva é considerado perfeito se  $S_r=0$  e  $r=r^2=1$ .

# 4. DESENVOLVIMENTO

- 4.1 Preparação do molde para os testes
- 4.2 Aquecimento dos moldes na mesa de aquecimento
- 4.3 Aquecimento dos moldes nas prensas
- 4.4 Ajuste do polinómio  $T=T(t)$
- 4.5 Propostas de melhoria



## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 Preparação do molde para os testes

Antes de montar os termopares no molde, fizeram-se as uniões de solda numa das pontas dos fios dos termopares e calibraram-se os mesmos. O processo de soldadura e calibração estão descritos no Anexo 2 na página 122.

Os termopares foram aplicados em vários pontos do molde. Estes foram escolhidos para obter o campo de temperaturas que permita entender o fluxo de calor. Utilizar-se-á o sistema de coordenadas  $r$  (radial),  $z$  (axial) e  $\theta$  (angular), de forma a compreender-se o modo como o aquecimento do molde ocorre e permitindo assim traduzi-lo matematicamente. Para isso, dividiu-se o conjunto MC em 4 secções, cada uma correspondente a um ângulo de  $90^\circ$  em  $\theta$  entre elas, ver Figura 38.a.

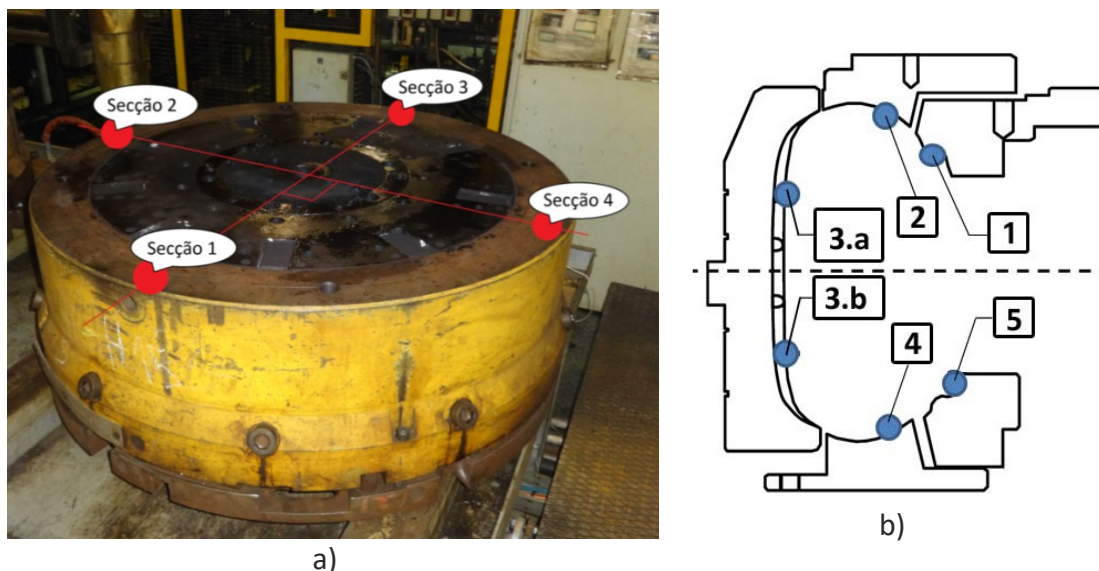


Figura 38: Posicionamento dos pontos num conjunto MC: a) segundo  $\theta$ , b) segundo  $r$ ,  $Z$ .

Cada secção possui 6 termopares, ver Figura 38.b. A medição das temperaturas nas várias secções permite-nos saber se existe variação de temperaturas significativas segundo  $\theta$ .

O vapor no contentor circula na seguinte forma: entra na secção 3, passa na secção 2, secção 1, secção 4 e sai pela secção 3. Também se colocaram termopares ao longo das coordenadas  $r$  e  $z$ , em cada secção, ficando na seguinte forma, ver Figura 38.b:

- Ponto 1: Ponto de medição no anel do talão superior;
- Ponto 2: Ponto de medição na parede superior;
- Ponto 3.a: Ponto superior de medição no segmento;
- Ponto 3.b: Ponto inferior de medição no segmento;
- Ponto 4: Ponto de medição na parede inferior;
- Ponto 5: Ponto de medição no anel do talão inferior.

De forma a tornar as análises dos dados mais fácil quando se comparar os valores entre os testes realizados na mesa de aquecimento e na prensa, foi adoptada a seguinte nomenclatura para cada ponto:

Nome do canal	Peça e secção
Anel_Sup_1	Anel do talão superior na secção 1

Na Tabela 8 estão expostos todos os pontos existentes no molde.

Tabela 8: Posições dos canais no molde.

Peça	Canal
<b>Anel do talão superior (Ponto 1- Figura 38.b)</b>	Anel_Sup_1, Anel_Sup_2, Anel_Sup_3, Anel_Sup_4
<b>Parede superior (Ponto 2 - Figura 38.b)</b>	Par_Sup_1, Par_Sup_2, Par_Sup_3, Par_Sup_4
<b>Segmento (ponto superior) (Ponto 3.a - Figura 38.b)</b>	Seg_Sup_1, Seg_Sup_2, Seg_Sup_3, Seg_Sup_4
<b>Segmento (ponto inferior) (Ponto 3.b - Figura 38.b)</b>	Seg_Inf_1, Seg_Inf_2, Seg_Inf_3, Seg_Inf_4
<b>Parede inferior (Ponto 4 - Figura 38.b)</b>	Par_Inf_1, Par_Inf_2, Par_Inf_3, Par_Inf_4
<b>Anel do talão inferior (Ponto 5 - Figura 38.b).</b>	Anel_Inf_1, Anel_Inf_2, Anel_Inf_3, Anel_Inf_4

Para fixar os termopares no molde, recorreu-se a ímanes e a *eurovents*. Utilizaram-se os ímanes nas paredes e nos anéis do talão devido a estas serem fabricadas em aço. Como os segmentos são fabricados em alumínio e possuem uma superfície muito complexa, recorreu-se aos *eurovents* para fixar os termopares nestas peças. Após colocar os termopares nos vários pontos para teste, Figura 40, fecha-se o contentor para iniciar os testes, ver Figura 41.



a)



b)

Figura 39: Fixação dos termopares no molde: a) recurso a ímanes, b) recurso a *eurovents*.



Figura 40: Termopares fixados nos segmentos, na parede superior e no anel do talão superior.



Figura 41: Contentor fechado e pronto para efectuar os testes.

A montagem dos termopares no conjunto MC exige tempo e cuidado. Este procedimento demora cerca de 3/4h, e exige todo o cuidado com os fios do termopar durante a montagem do molde no contentor, assim como, quando se fecha o conjunto MC (Molde/Contentor). A recolha dos dados foi feita com termopares tipo J, juntamente com um *datalogger* da marca AIS, o modelo *Agil II 80C535*. No Anexo 1 na página 121, estão todos os dados e informações técnicas acerca do *datalogger* e do tipo de termopar utilizado.

Contudo, antes de colocar os termopares nos diferentes pontos do molde, é necessário saber o seguinte:

- Massa dos diferentes moldes no mesmo contentor;
- Massa do contentor;
- Capacidade e localização das câmaras de vapor.

Para os ensaios, seleccionaram-se os contentores EGS, EGV, EGX, EG43, G46 e G50. Os contentores EGS, EGV e EGX foram seleccionados por apresentarem as seguintes características: o contentor mais leve (EGS), o contentor com o peso intermédio (EGV) e o contentor com o maior peso (EGX), dentre dos contentores com câmara de vapor na placa inferior. Também dentro deste tipo de contentor, o EG43 é o contentor que possui a maior capacidade de vapor total (12,6 dm<sup>3</sup> e 7,5 dm<sup>3</sup>). Já o contentor G46 e G50 foram escolhidos por só terem câmara de vapor no cone.

Escolhidos os contentores (ver Figura 14 – peças com símbolo +), escolheram-se os moldes (ver Figura 14 – peças com símbolo #) para montar nesses contentores. Para isso, verificou-se quais as medidas que eram montadas em cada contentor seleccionado, e escolheu-se o molde mais leve, o mais pesado e o molde com uma massa intermédia. Na Tabela 9 estão as medidas de pneus seleccionadas para os testes. No contentor EGV foram escolhidas 5 medidas de pneus, com o intuito de perceber qual é o comportamento do aquecimento em diferentes tamanhos de pneus num mesmo contentor.

Tabela 9: Medidas e contentores seleccionados para os testes.

Contentor	Medida	Contentor	Medida
EGS	175/65 R14	EG43	265/70 R16
	125/80 R15		255/50 R19
	195/55 R16		255/30 R21
EGV	225/60 R16	EGX	275/40 R18
	225/55 R17		295/25 R20
	225/40 R18	G46	265/65 R17
	235/40 R19		275/45 R18
	245/35 R20		255/50 R20
G50	255/55 R20		

É de salientar, desde já, que não foi possível testar todas as medidas de pneus aqui seleccionadas, derivado aos seguintes factores:

- Disponibilidade de espaço na oficina para montar os termopares no molde;
- Falta de cavidades disponíveis para a realização de testes devido ao aumento da produção de pneus;
- Necessidade da parte da CMIP do *datalogger* para testes internos.

Contudo, foi possível realizar vários testes com algumas das medidas seleccionadas na Tabela 9. Estas medidas seleccionadas estão expostas na Tabela 10, no caso dos testes na mesa de aquecimento, e na Tabela 12, no caso dos testes na prensa.

## 4.2 Aquecimento dos moldes na mesa de aquecimento

### 4.2.1 Processo experimental

O primeiro dispositivo a ser estudado é a mesa de aquecimento, ver Figura 43, devido a utilizar-se primeiro a mesa de aquecimento para aquecer o conjunto MC (conjunto Molde/Contentor) e só depois é que monta o conjunto MC nas prensas.

O método de montagem do conjunto MC na mesa de aquecimento é o mesmo que é explicado no capítulo 2.6 e no 4.1: primeiro fixam-se os termopares nos pontos escolhidos e fecha-se o conjunto MC; depois coloca-se o conjunto MC sobre a mesa de aquecimento e colocam-se as mangueiras de vapor no cone, ver Figura 42.

Momentos antes de se abrir as válvulas, recolhe-se valores da temperatura do molde. Passado aproximadamente 20 segundos, abrem-se as válvulas, que se deixam abertas durante 4h. No final, guarda-se o conjunto MC na ramada (Local de armazenamento de contentores e moldes) para arrefecer e realizar o teste na prensa.

Foram escolhidos inicialmente 12 conjuntos MC, ver Tabela 9, mas só foram testados 8 conjuntos MC, ver Tabela 10. Isto deve-se a que durante as medições deparou-se uma evolução do campo de temperaturas igual em todos os moldes escolhidos. Outra razão foi a de que o tempo necessário para atingir os 170°C, em todo o molde, é demasiado extenso, e do ponto de vista da produção, impraticável.

Estas conclusões vão estar mais explícitas e aprofundadas na secção que se segue, secção 4.2.2.



Figura 42: Ligações de vapor entre o conjunto MC e a mesa de aquecimento.



Figura 43: Medições ao conjunto MC montado na mesa de aquecimento.

Tabela 10: Contentores, medidas e massas dos moldes usados para teste.

Contentor	Medida do pneu	Massa dos moldes (kg)
EGS	175/65 R14	255
	195/55 R16	287
EGV	225/40 R18	334
	225/60 R16	423
	225/55 R17	428
EGX	275/40 R18	527
	295/25 R20	506
G46	265/65 R17	498

#### 4.2.2 Resultados e Conclusões

Após a recolha das temperaturas nas diferentes peças do MC durante o aquecimento na mesa de aquecimento, faz-se a análise destes dados. Da Figura 44 até à Figura 51 estão representadas as curvas da evolução das temperaturas, ao longo do tempo, de diferentes conjuntos MC.

Realizando uma primeira análise, observa-se em todos os testes realizados dois conjuntos de curvas de aquecimento (por um lado 3.a e 3.b, e por outro 1, 2, 4 e 5), com uma diferença média entre elas de aproximadamente 20°C.

O conjunto que regista os valores mais elevados diz respeito às temperaturas registadas nos pontos 3.a e 3.b dos gráficos (ver Figura 38.b). Já o conjunto com os menores valores (1, 2, 4 e 5) diz respeito aos valores registados nas restantes peças do molde: parede superior (ponto 2), anel do talão superior (ponto 1), parede inferior (ponto 4) e anel do talão inferior (ponto 5), ver Figura 38.b.

Esta diferença de temperatura entre os dois conjuntos de curvas deve-se ao modo como o calor cedido pelo vapor ao conjunto MC se distribui entre as peças 3.a e 3.b por um lado, e as peças 1, 2, 4 e 5 por outro lado.

Também nos gráficos da Figura 47 até 54, se verifica que a faixa das curva de temperatura dos pontos 3.a e 3.b (alumínio com  $K=117 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ ) é mais estreita que a faixa das curvas de temperaturas dos pontos 1, 2, 4 e 5 (liga de aço com  $K=41 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ ), porque a condutibilidade do alumínio é maior que a do aço, de que resulta uma maior uniformidade das temperaturas nas peças de alumínio do que do aço.

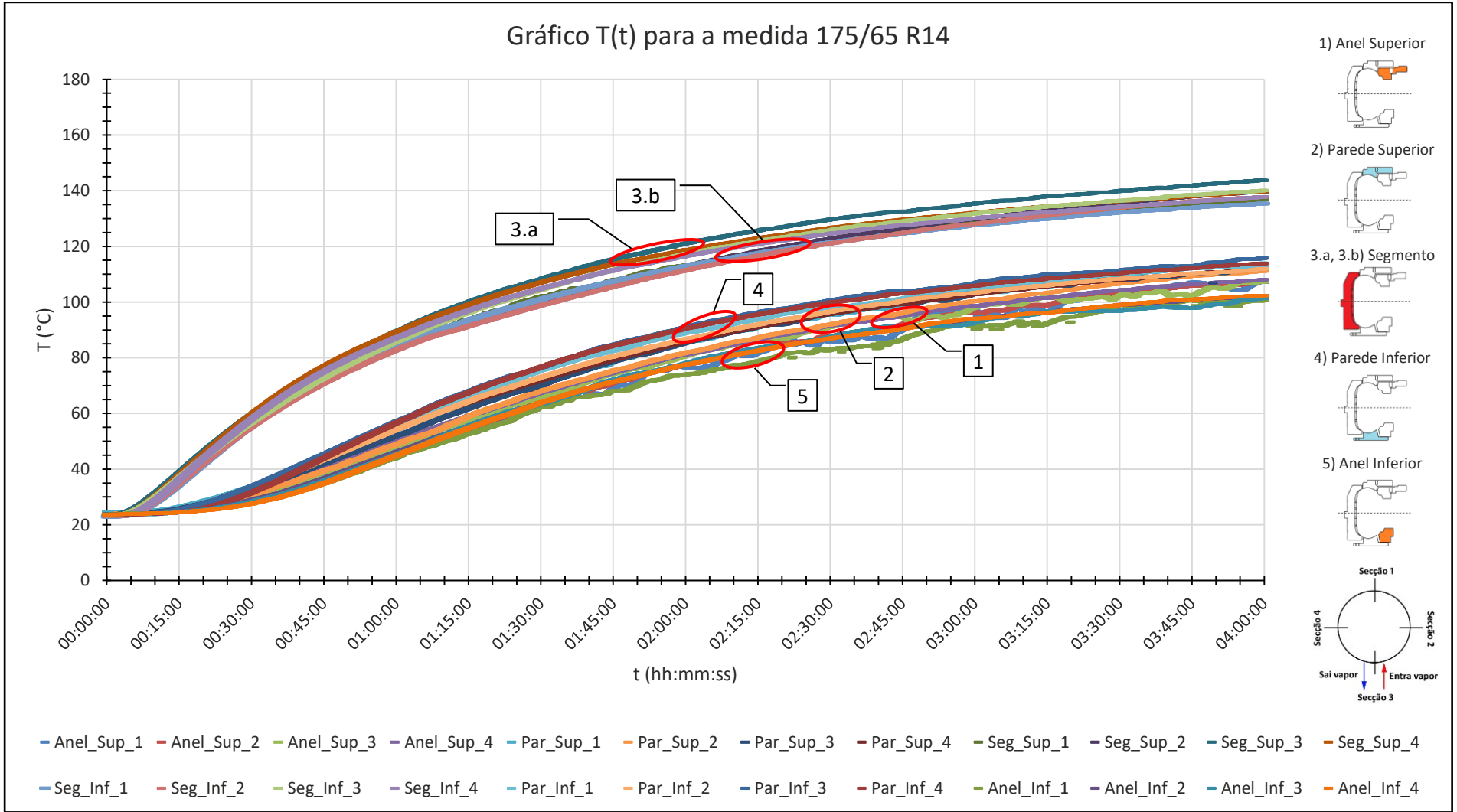


Figura 44: Gráfico T(t) da medida 175/65 R14 montado no contentor EGS.

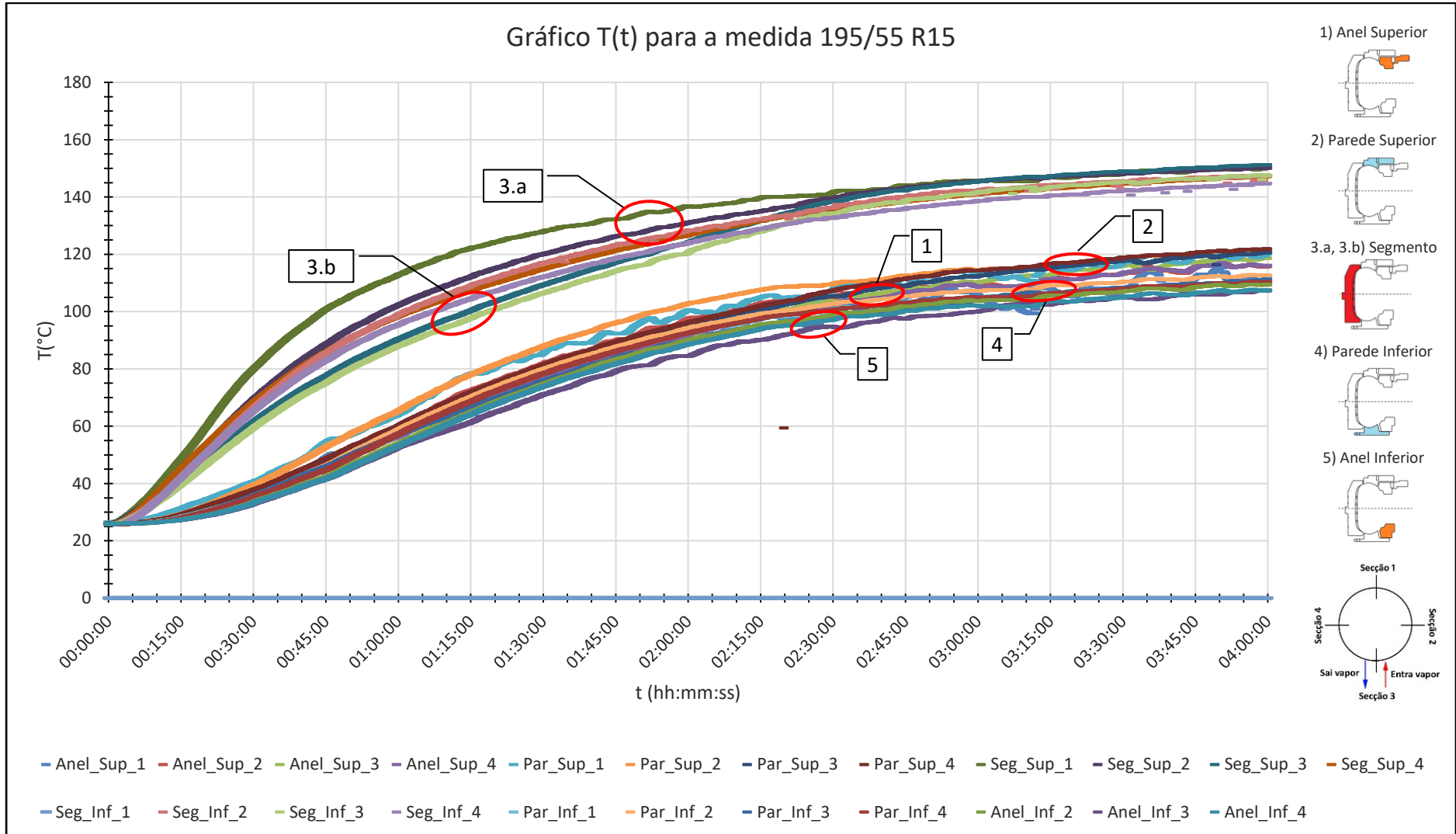


Figura 45: Gráfico T(t) da medida 195/55 R16 montado no contentor EGS.

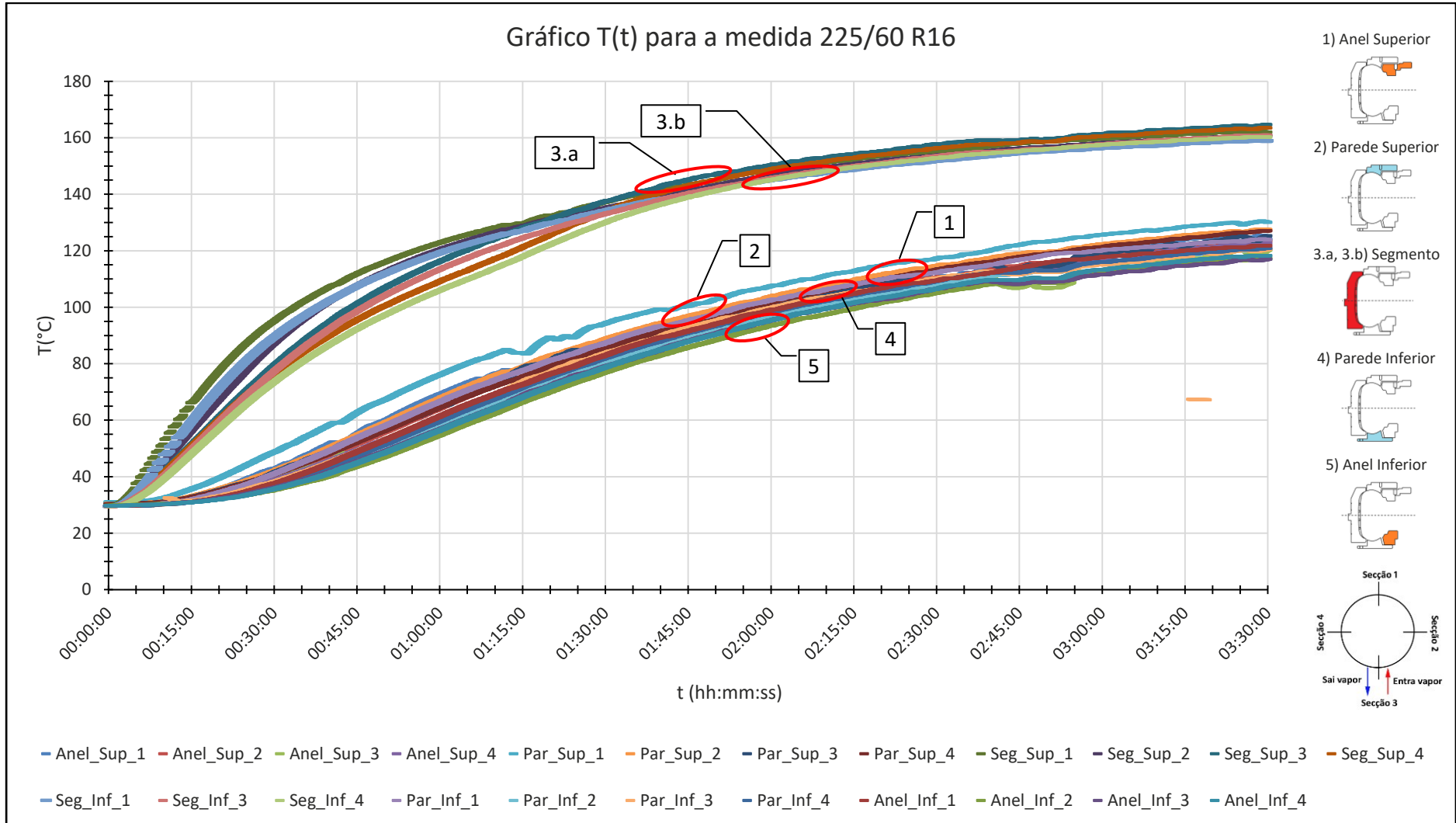


Figura 46: Gráfico T(t) da medida 225/60 R16 montado no contentor EGV.

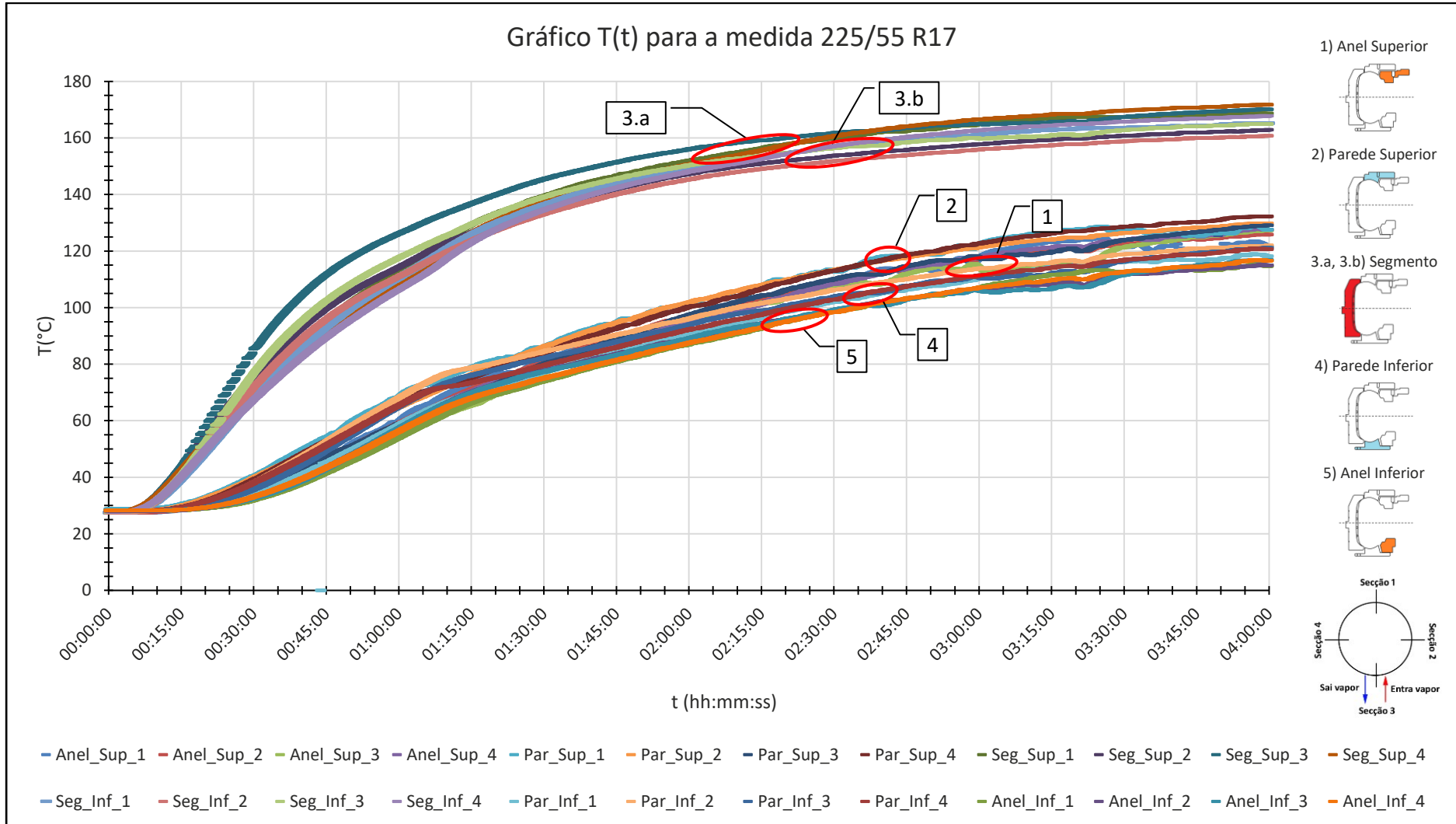


Figura 47: Gráfico T(t) da medida 225/55 R17 montado no contentor EGV.

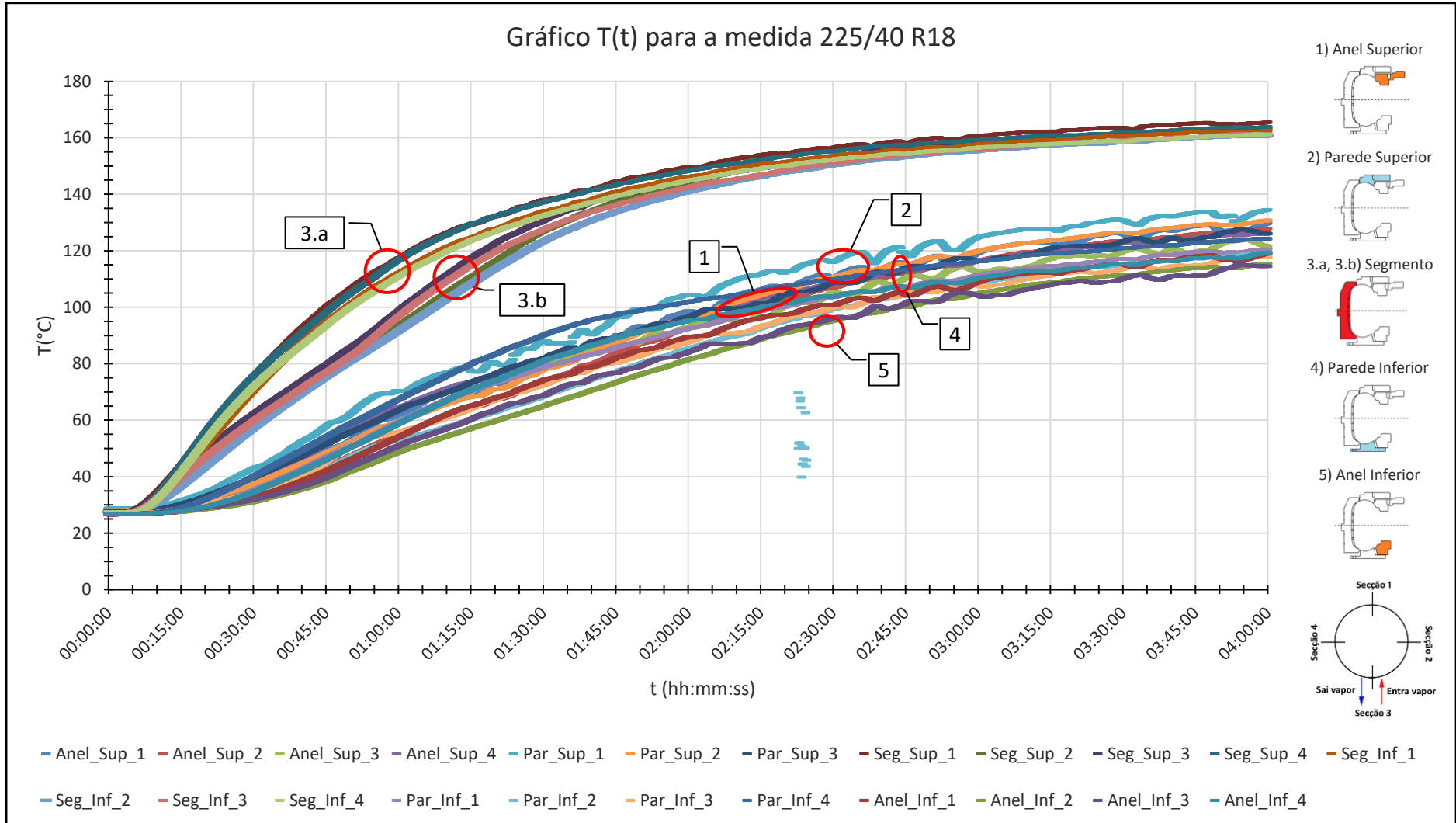


Figura 48: Gráfico T(t) da medida 225/40 R18 montado no contentor EGV.

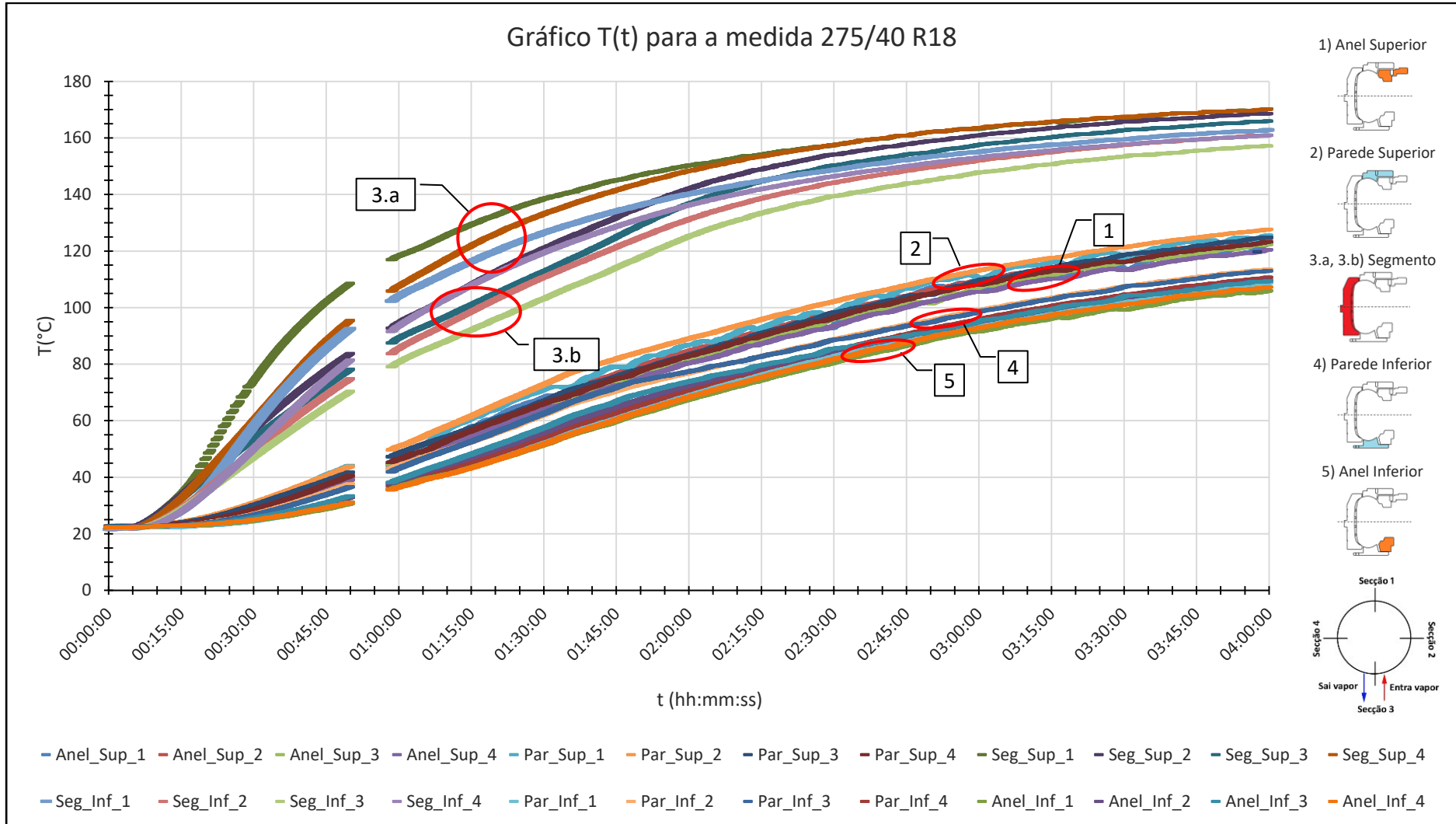


Figura 49: Gráfico T(t) da medida 275/40 R18 montado no contentor EGX.

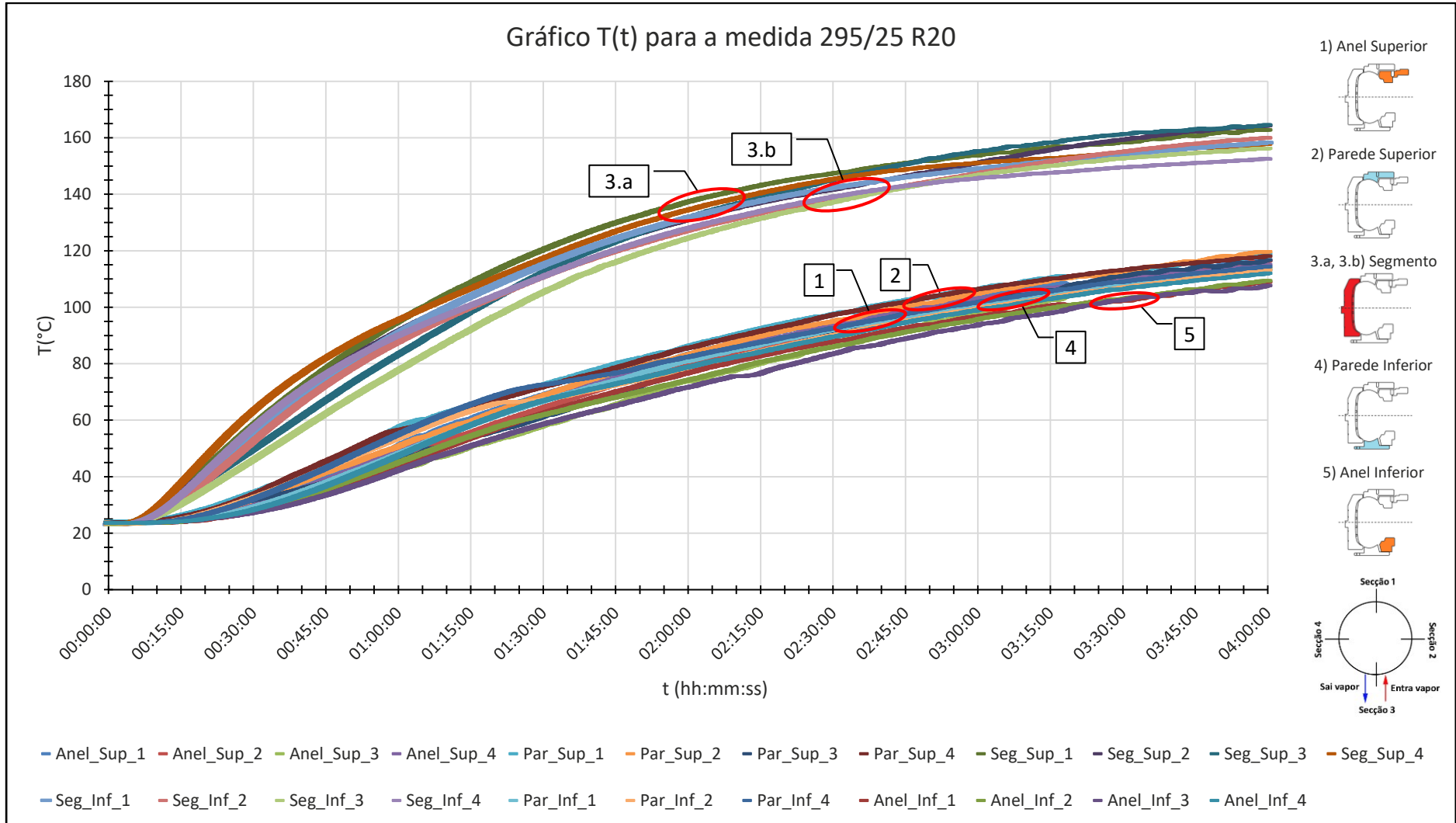


Figura 50: Gráfico T(t) da medida 295/25 R20 montado no contentor EGX.

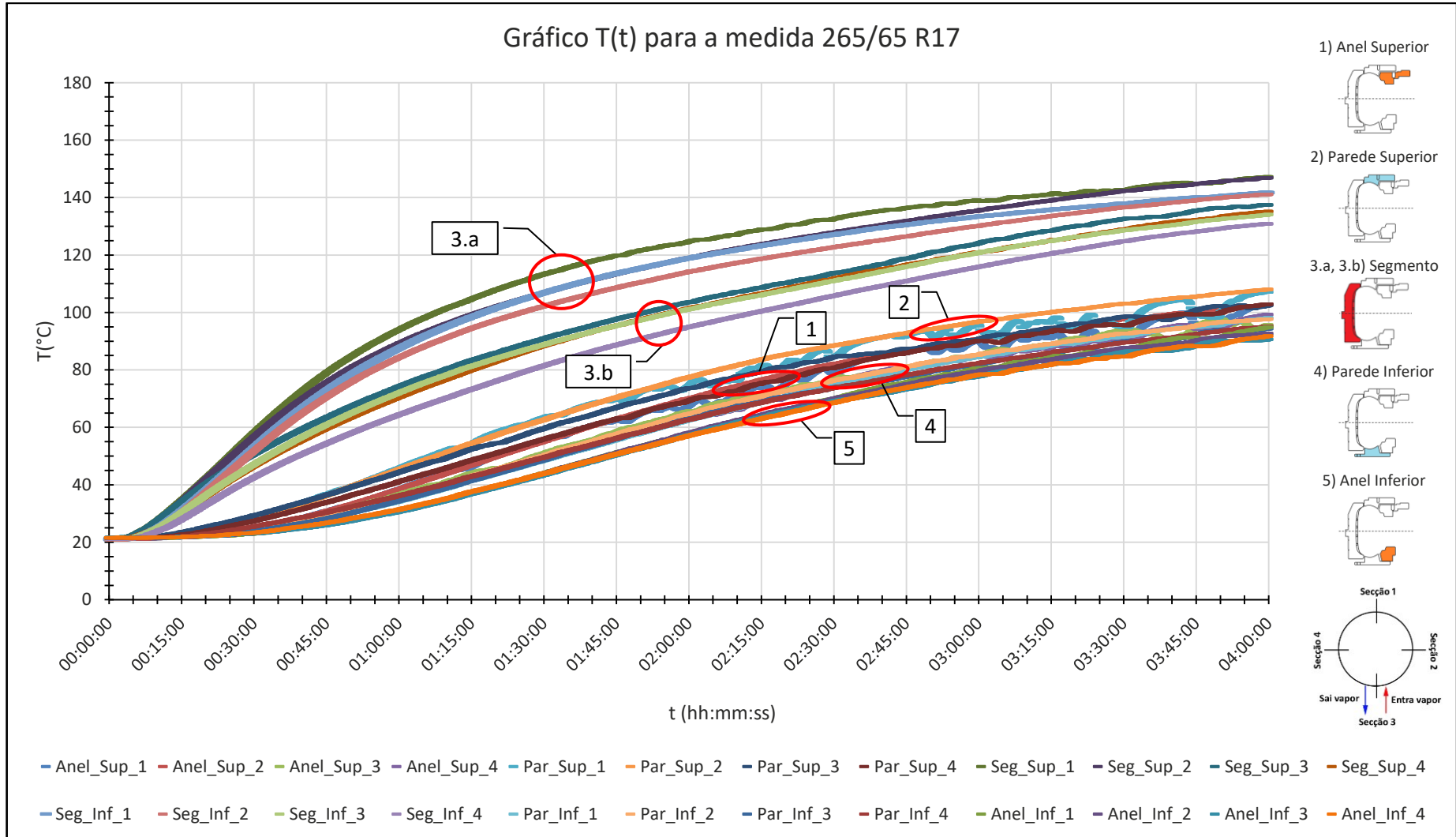


Figura 51: Gráfico T(t) da medida 265/65 R17 montado no contentor G46.

Outro factor que explica a diferença de taxa de aquecimento entre as várias peças do conjunto MC é a resistência de contacto entre estas mesmas, que se deve às peças não estarem totalmente encostadas umas com as outras. Além disso, as temperaturas dos pontos 3.a são superiores do que as temperaturas nos pontos 3.b; isto acontece porque a câmara de vapor está mais próxima dos pontos 3.a dos que dos pontos 3.b., ver Figura 23.

A diferença de temperaturas entre as curvas referentes aos pontos 3.a e 3.b é, no máximo, e para um dado um instante de tempo de aquecimento, 10°C. O mesmo sucede na diferença de temperaturas para o ponto 1, 2, 4 e 5.

Numa análise segundo a coordenada angular,  $\theta$ , as temperaturas dos pontos homólogos nas quatro secções existentes nos segmentos, 3.a e 3.b, diferem entre si, no máximo 5/7°C.

Os pontos 1 e 2 possuem um aquecimento mais rápido em comparação com os pontos 4 e 5. Os pontos 2 têm temperaturas mais altas que os pontos 1, estes que os pontos 4 e, finalmente, estes que os pontos 5. Isto explica-se porque os pontos mais próximos da câmara de vapor são os pontos 2, logo a seguir os pontos 1, depois os 4 e finalmente os 5.

As diferenças de temperaturas entre os pontos homólogos das peças 4 e 5, são pequenas, não excedem os 7°C, o que indica uma resistência de contacto baixa entre estas peças. O mesmo se sucede entre as peças 1 e 2.

Por outro lado,  $\Delta T/\Delta\theta < 5^\circ\text{C}$  para qualquer dos pontos medidos nas 4 secções do conjunto MC.

Observando o gráfico da Figura 49, depara-se com uma falha de dados após 49 minutos de teste, e teve uma duração de 10min. Isto deveu-se à necessidade de reiniciar o computador por causa de um erro existente no sistema operativo. Contudo deixou-se o vapor ligado e continuou-se a gravação dos dados no mesmo ficheiro.

Com base nesta análise, considerar-se-á que na equação (2) para dada peça do conjunto MC,  $T(r, \theta, z, t)$  é aproximável por  $T(t)$ .

Tabela 11: Temperatura mais baixa atingida ao fim de 4h de aquecimento.

Contentor	Câmara de Vapor (dm <sup>3</sup> )	Medida	Massa do molde(kg)	Temperatura final (t <sub>ref</sub> – 4hrs) (°C)	
				Segmentos	Anel Inferior
EGS	2,5	175/65 R14	255	136	100
		165/55 R16	287	145	110
EGV	6,7	225/60 R16	423	158	115
		225/55 R17	428	161	115
		225/40 R18	334	161	113
EGX	7,6	295/25 R20	506	153	110
		275/40 R18	527	158	109
G46	15,2	265/65 R17	598	130	90

Olhando agora para as temperaturas atingidas ao fim de 4h, a Tabela 11 possui as temperaturas mínimas registadas nos dois conjuntos de curvas.

Como foi dito inicialmente, foram seleccionados dezassete conjuntos MC. Contudo, ao fim de oito medições observou-se uma repetição da forma como evoluía a temperatura. Devido ao curto espaço de tempo que existia e aos valores que se obtiveram nos testes, tomou-se a decisão de não se realizar mais testes na mesa de aquecimento.

### 4.3 Aquecimento dos moldes nas prensas

#### 4.3.1 Procedimento experimental

Após efectuar medições do aquecimento do molde na mesa de aquecimento, realiza-se o aquecimento do molde nas prensas, sem pneus. Para isso é montado o mesmo molde utilizado nas medições feitas na mesa de aquecimento, visto já estar com os termopares fixados no molde.

Esta forma de aquecer os moldes é também alvo de estudo devido às prensas terem esta opção, como também, estarem equipadas com isolamento térmico e com câmaras de vapor existente na parte inferior e superior.

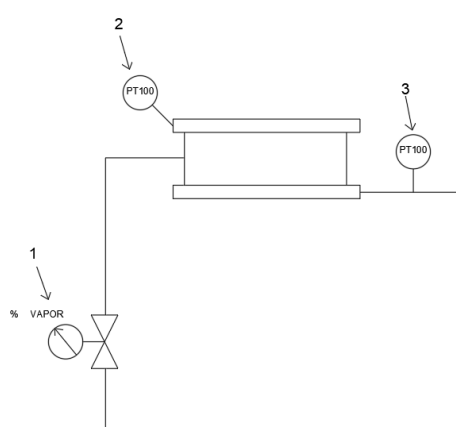
Para montar o conjunto MC nas prensas é necessário um procedimento mais complexo, em relação à montagem do conjunto MC na mesa de aquecimento, sendo necessário operadores preparados para efectuar a montagem do conjunto MC nas prensas. Esta montagem consiste nos seguintes passos:

1. Com o auxílio de um empilhador, recolhe-se o conjunto MC que se encontra na ramada;
2. Abre-se a cavidade da prensa onde se vai efectuar o teste e coloca-se o conjunto MC dentro da cavidade. Retiram-se os parafusos existentes no contentor para poder abri-lo posteriormente;
3. Fecha-se a cavidade e colocam-se os parafusos na parte superior da prensa de maneira a aparafusar a parte superior do contentor com a parte superior da prensa;
4. Ligam-se as mangueiras de vapor ao contentor e à prensa. Coloca-se a sonda PT100 no segmento e depois liga-se o modo “aquecimento de moldes” na prensa.



Figura 52: Medição da temperatura do molde na prensa.

Na Figura 52, pode-se visualizar o aspecto final da instalação para se efectuar as medições. Teve-se o máximo cuidado ao fechar a prensa para não haver o infortúnio de cortar fios dos termopares. Durante o aquecimento do conjunto MC é possível monitorizar vários parâmetros; para este teste só três parâmetros têm mais interesse, ver Figura 53.



#### Legenda

1. Abertura da válvula de entrada de vapor;
2. Temperatura do segmento;
3. Temperatura do fluido térmico à saída da prensa.

Figura 53: Esquema dos aparelhos de medida nas tubagens de uma cavidade.

Os conjuntos MC usados são os mesmos que se utilizaram para o teste do aquecimento na mesa. Contudo houve certas medidas em que o teste não correu como inicialmente pensado: fios termopares cortados durante a montagem do molde na prensa, avarias nas prensas, válvulas entupidas, entre outros problemas. A repetição dos testes em algumas medidas, nem sempre foi possível: a não disponibilidade de operadores para montar os conjuntos MC nas prensas ou não existir cavidades disponíveis para teste. Mesmo assim, conseguiu-se valores com os seguintes conjuntos MC, ver Tabela 12.

Tabela 12: Contentores, medidas e massa dos moldes usados nos testes.

Contentor	Medida	Massa dos moldes (kg)
<b>EGS</b>	195/55 R16	287
	225/40 R18	334
<b>EGV</b>	225/60 R16	423
	225/55 R17	428
<b>EGX</b>	275/40 R18	527
	295/25 R20	506
<b>EG43</b>	205/80 R16	483
<b>G46</b>	265/65 R17	498
	255/50 R20	505

Como os conjuntos MC utilizados são os mesmo que foram utilizados aquando do teste na mesa de aquecimento, as posições e os nomes dos pontos de medição são os mesmos que estão expostos no capítulo 4.1, Página 69.

### 4.3.2 Resultados e discussão

Após ter-se recolhido todos os dados nos diferentes contentores e medidas, deve-se analisar os dados obtidos de forma a compreender o fluxo de calor em todo o molde e assim poder construir o modelo matemático capaz de descrever este aquecimento.

Analisando os gráficos da Figura 54 até à Figura 60 têm-se três conjuntos de curvas distintos. De forma a facilitar a análise dos gráficos, dividiu-se e identificou-se estes conjuntos na seguinte forma:

- O conjunto A possui as curvas de aquecimento mais rápidas, pertencendo ao aquecimento da parede inferior (ponto 4) e do anel do talão inferior (ponto 5).
- O conjunto B diz respeito às curvas que possuem uma evolução da temperatura intermédia, e que pertence aos pontos de medição existentes nos segmentos (ponto 3.a e o ponto 3.b).
- Já o conjunto C reúne as curvas com as temperaturas mais baixas, pertencentes aos pontos de medição da parede superior (ponto 2) e no anel do talão superior (ponto 1).

Este tipo de distribuição do campo de temperatura só se observa nos testes realizados com contentores que possuem câmara de vapor no cone e na placa inferior, significando assim, que as ligações de vapor são feitas segundo o esquema da Figura 19.a, da página 46.

Começando pelo conjunto A, que possui as curvas de aquecimento da parede inferior (Ponto 4) e do anel do talão inferior (Ponto 5), têm-se um aquecimento muito rápido destas duas peças em comparação com as outras peças. Este aquecimento rápido é causado pelo contacto directo da parede inferior com a câmara de vapor que existe na placa inferior do contentor. Como o anel do talão inferior, peça 5 da figura 13, se encontra montado sobre a parede inferior, peça 4 da figura 13, a transmissão de calor vai-se dar através da parede inferior para o anel do talão inferior (rever o capítulo 2.3, Figura 13). Prova disso, é a queda de temperatura que se verifica em todas as medições que se efectuou, em que o anel do talão inferior possui temperaturas mais baixas do que a parede inferior. Esta queda de temperatura entre a parede inferior e o anel do talão inferior é cerca de 5/7°C.

Passando agora para o conjunto B – Conjunto das curvas de aquecimento dos segmentos (pontos 3.a e 3.b) - verifica-se uma evolução da temperatura mais lenta. É de lembrar que os segmentos possuem dois pontos de medição: o ponto 3.a, que se encontra próximo da parede superior e o ponto 3.b que se encontra mais próximo da parede inferior. Observando os gráficos da Figura 54 até à Figura 60 tem-se que é no ponto 3.b onde se registam temperaturas mais elevadas, comparativamente com o ponto 3.a. Esta diferença média nunca foi superior a 10°C. Isto está relacionado com o facto de a parede inferior ter temperatura mais alta e fornecer energia à parte inferior do segmento (Ponto 3.b), contribuindo assim para que esta parte do segmento aqueça mais rapidamente. Já a parte superior do segmento (Ponto 3.a) aquece por causa da câmara de vapor que existe no cone.

Por último está o conjunto C, onde estão as curvas de temperatura da parede superior (Ponto 2) e do anel superior (Ponto 1). É neste conjunto que estão as peças que demoram mais tempo a atingir a temperatura desejável. Isto deve-se a que haja bastantes perdas de energia entre a parte superior do molde e o contentor, como também, entre o prato superior da prensa e a parte superior do contentor.

Entre a parede e o anel superior do molde, é no anel que se registam menores temperaturas para o mesmo intervalo de tempo, visto que é a parede superior que transmite calor ao anel superior. Sendo assim, são estas as duas peças que possuem o pior aquecimento e que provocam mais imperfeições nos pneus devido à falta de aquecimento do molde.

Comparando agora as temperaturas registadas nas 4 secções para cada peça em todos os conjuntos MC (segundo a coordenada angular,  $\theta$ ), ver Tabela 13, observa-se pequenas diferenças de temperatura durante o aquecimento, acabando por diminuir quando o “aquecimento de moldes” é desligado (ponto 6).

Tabela 13: Diferença de temperatura média (°C) de cada peça, segundo a coordenada  $\theta$ .

	Anel superior	Parede superior	Segmento (Ponto superior)	Segmento (Ponto inferior)	Parede inferior	Anel inferior
Diferença média (°C)	6	7	6	5	7	6

Sendo assim pode-se assumir que no aquecimento destas peças, segundo a componente angular,  $dT/d\theta$  é inferior a 0,02K/grau, o que se pode considerar próximo de zero.

Durante o aquecimento dos conjuntos MC, observou-se que o conjunto A possui um pico de temperatura num determinado instante e depois começa a diminuir até ficar a temperatura semelhante à do conjunto 2. Este pico é causado pela primeira fase do modo “Aquecimento de moldes” existente nas prensas, ver capítulo 2.5 página 45. Como foi dito anteriormente, este modo de aquecimento possui duas fases. A primeira fase, designada por “Aquecimento do molde”, o sistema coloca a válvula de vapor 100% aberta, de forma a que seja fornecida a potência térmica máxima ao molde. Este regime é mantido até que a temperatura do molde ( $T_{molde}$ ) seja igual a 165°C. Quando atingida essa temperatura, o sistema regula a válvula de forma a que a temperatura do vapor à saída da prensa ( $T_{vs}$ ) seja entre 170°C e 175°C, activando a 2ª fase: “Aquecimento final do molde”. Esta fase tem como objectivo estabilizar a temperatura em todo o molde, e possui uma duração aproximada de 15 minutos. Observando os resultados deparou-se que quando os segmentos se encontravam a 165°C, as temperaturas que se registam na parede e anel do talão inferior (Ponto 4 e 5) são as mais altas, onde com a activação do segundo fase, estas temperaturas tendem para o mesmo valor.

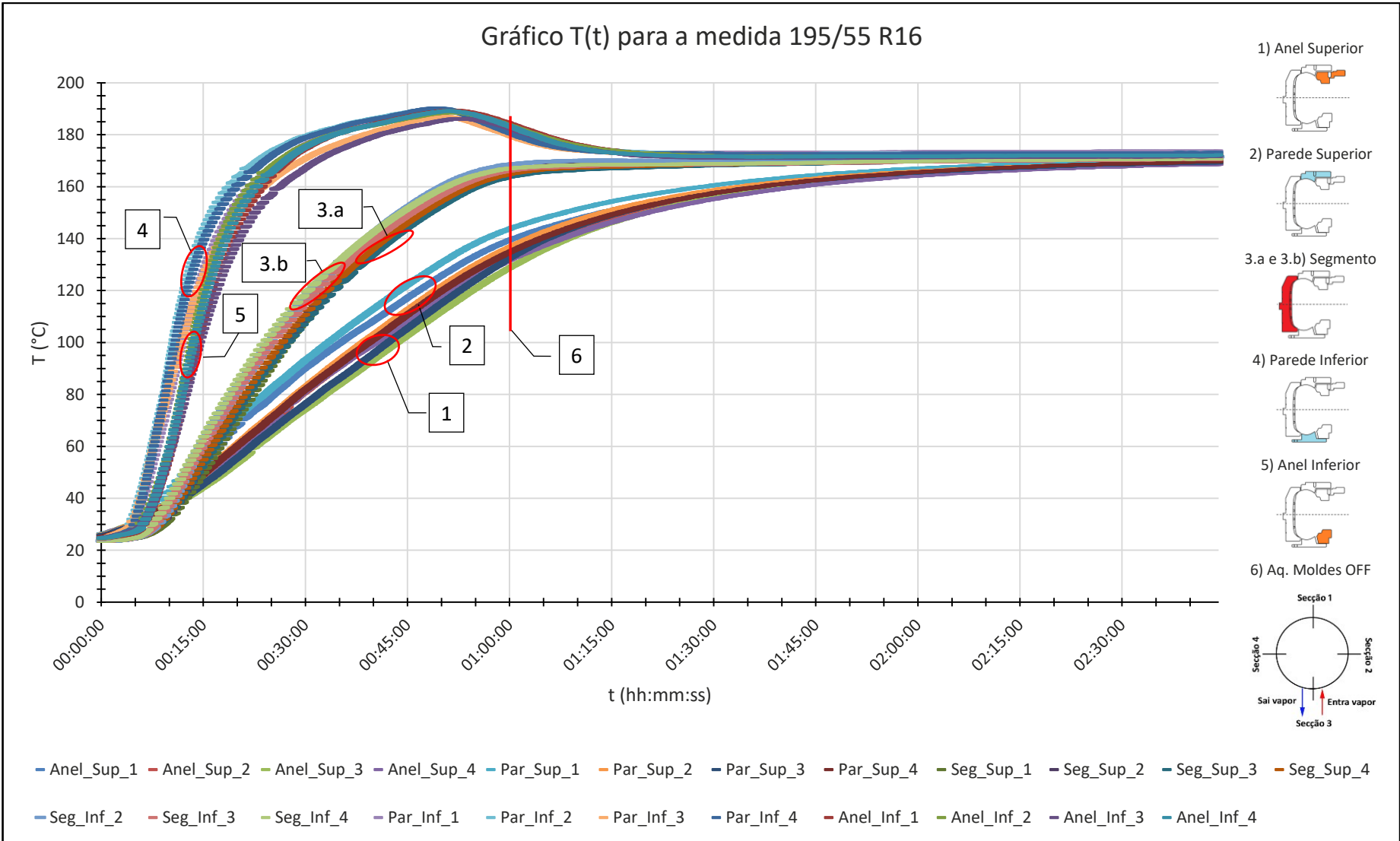


Figura 54: Gráfico T(t) da medida 195/55 R16 montado no contentor EGS.

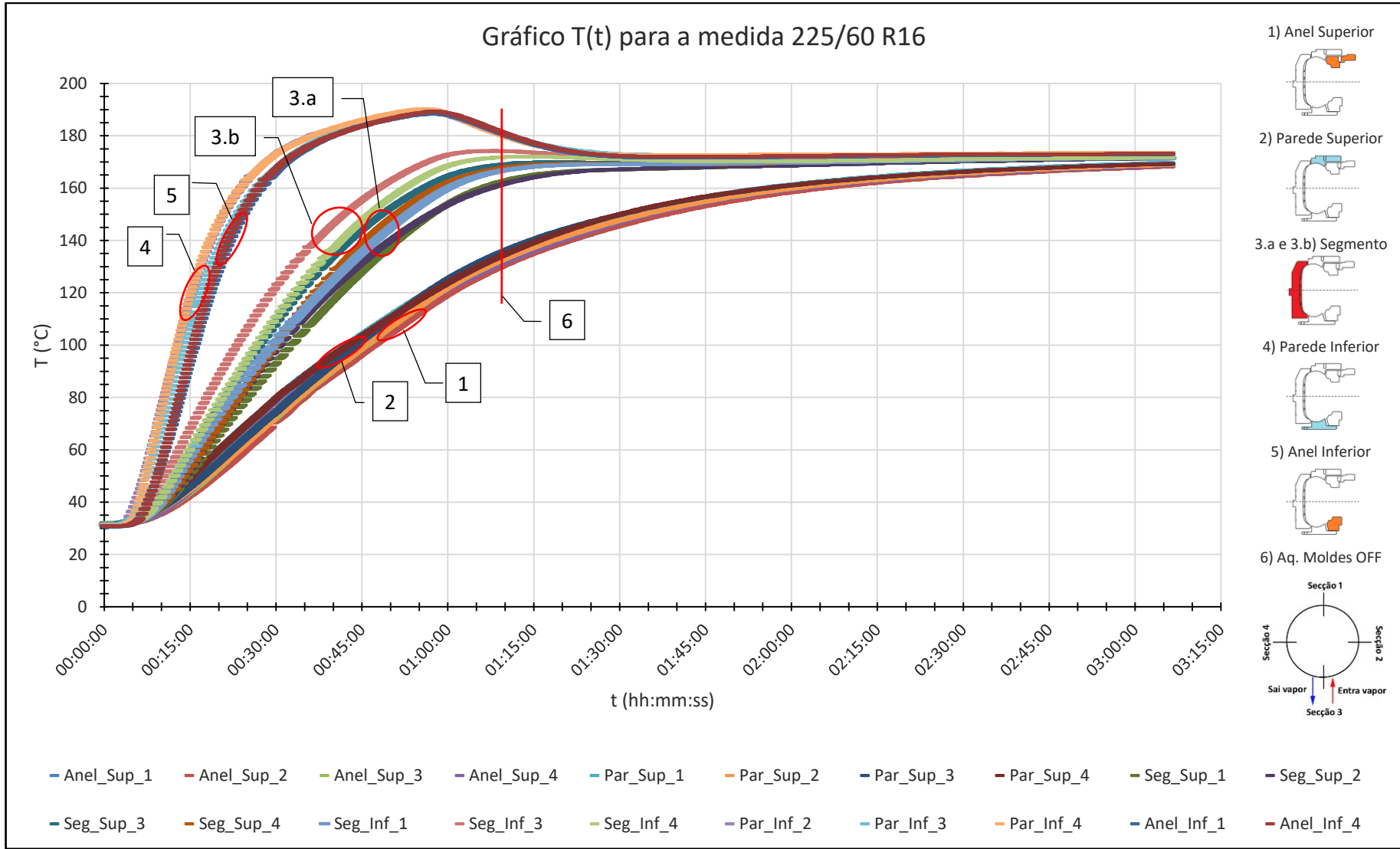


Figura 55: Gráfico T(t) da medida 225/55 R16 montado no contentor EGV.

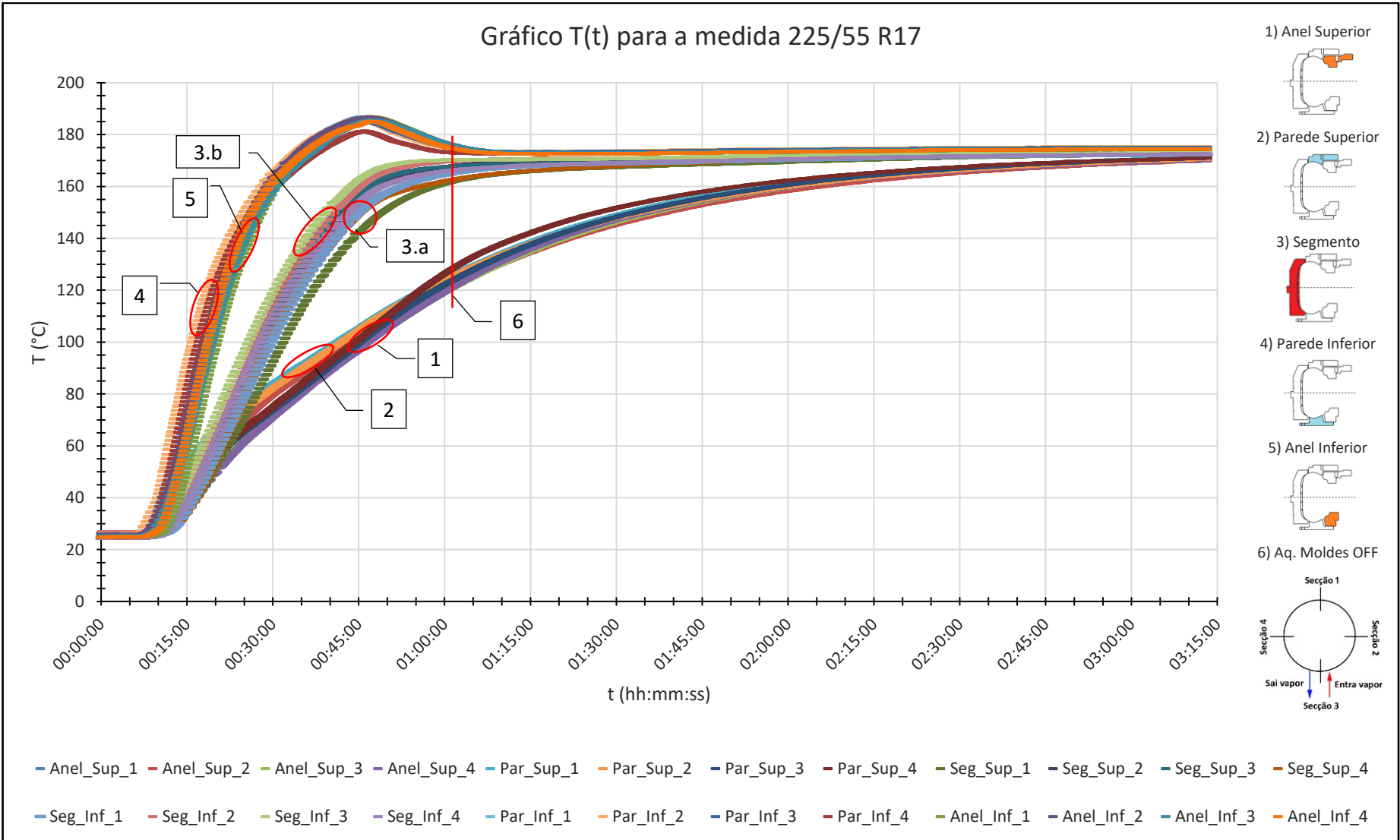


Figura 56: Gráfico T(t) da medida 225/55 R17 montado no contentor EGV.

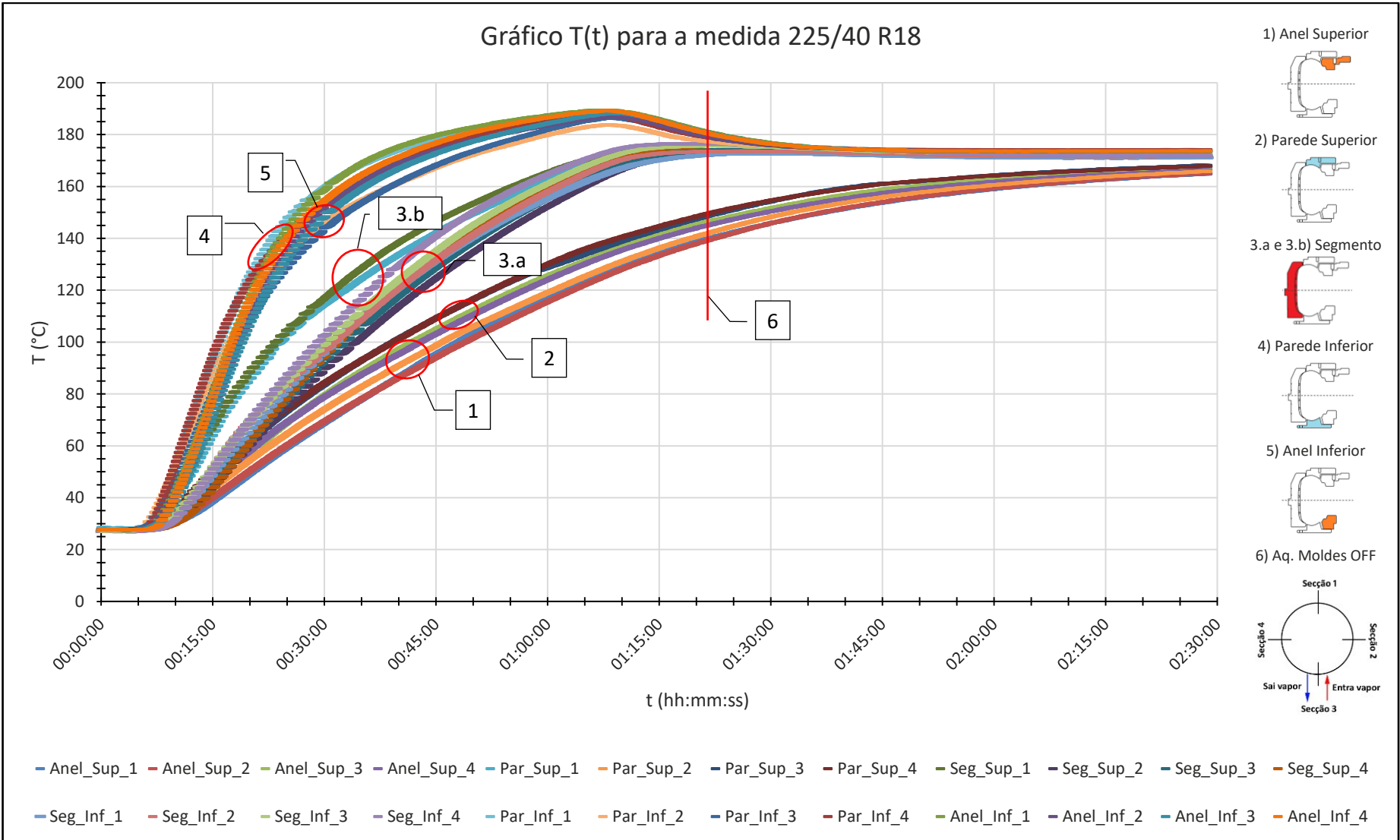


Figura 57: Gráfico T(t) da medida 225/40 R18 montado no contentor EGV.

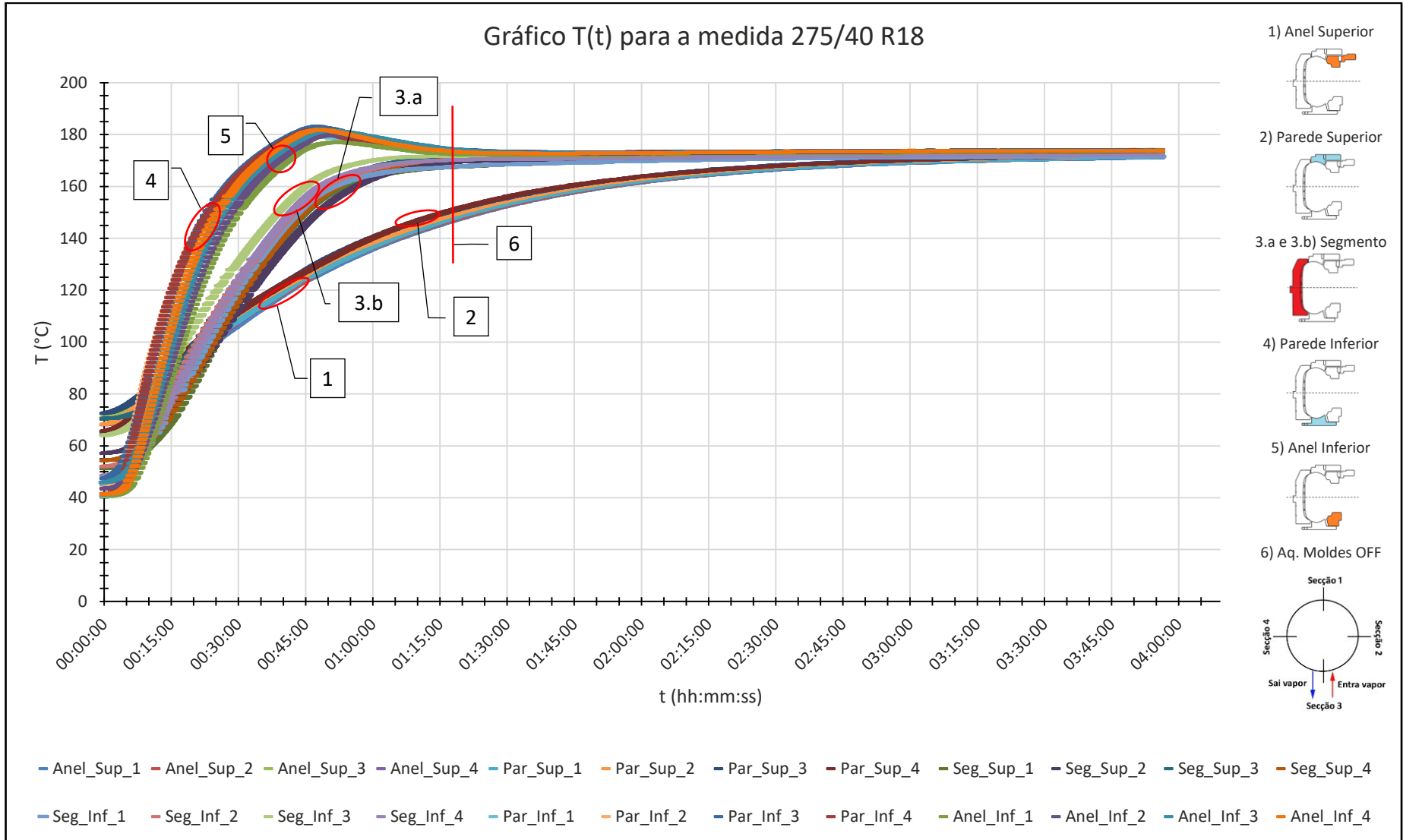


Figura 58: Gráfico T(t) da medida 275/40 R18 montado no contentor EGX

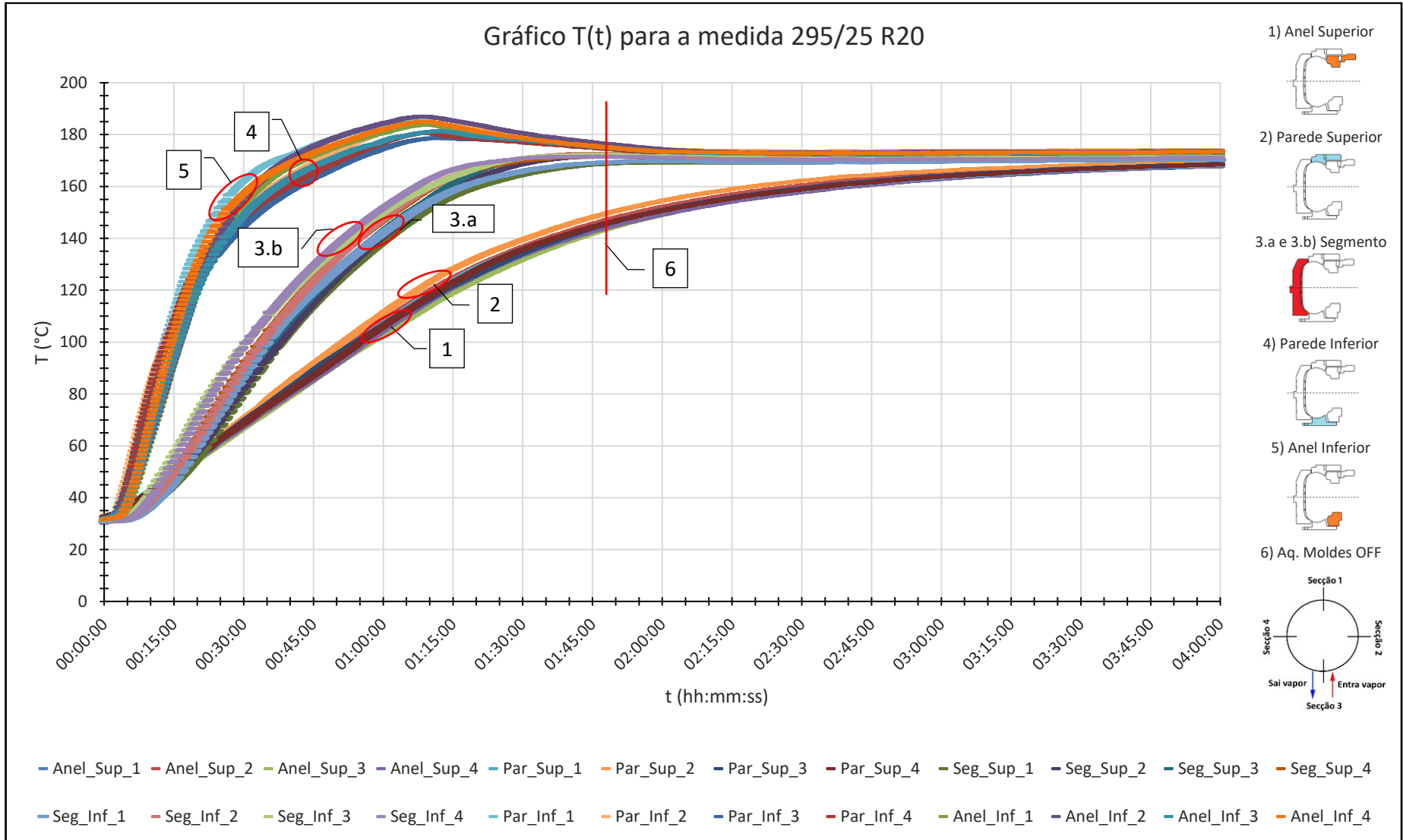


Figura 59: Gráfico T(t) da medida 295/25 R20 montado no contentor EGX.

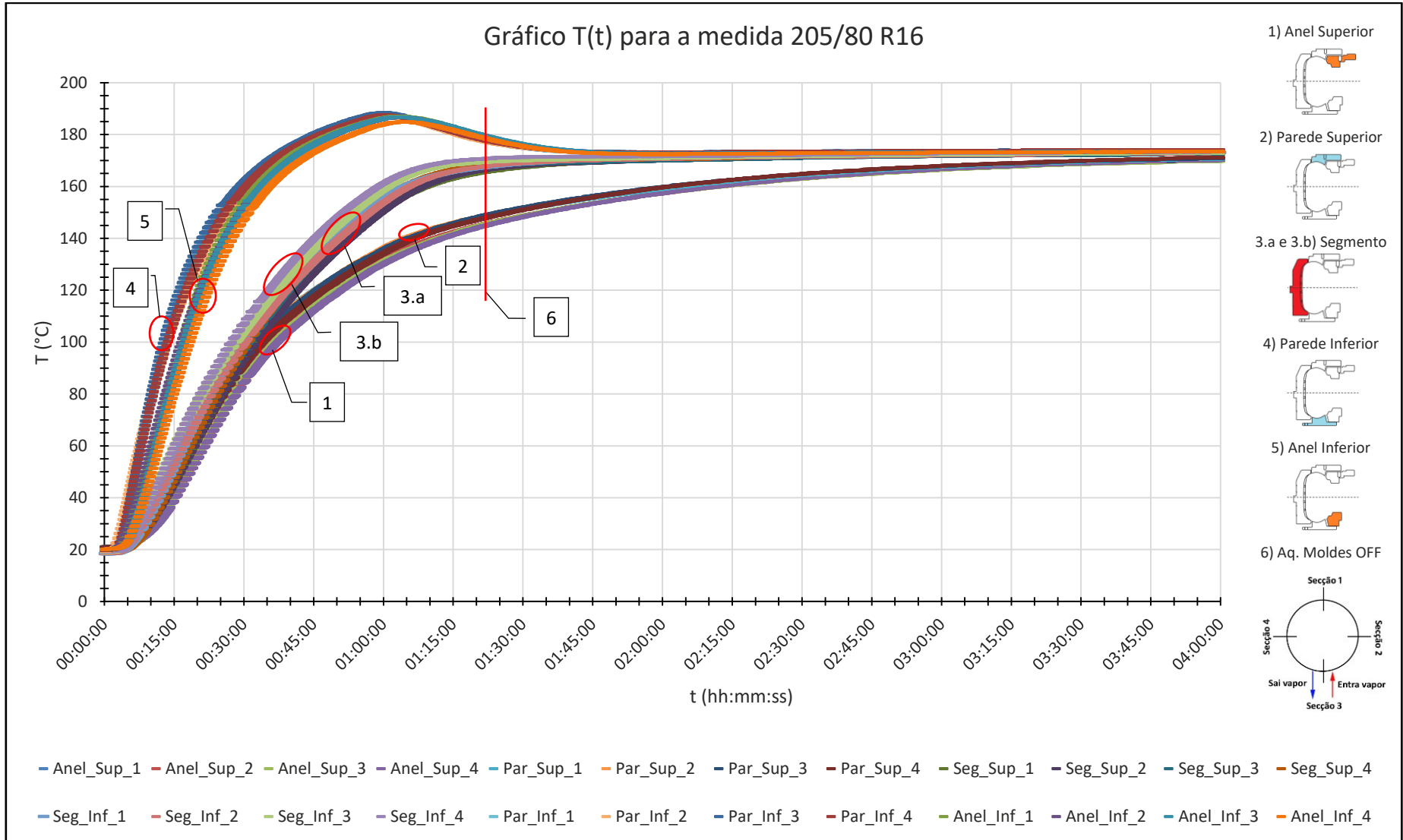


Figura 60: Gráfico T(t) da medida 205/80 R16 montado no contentor EG43.

Na Tabela 14 estão os tempos necessários para que o conjunto MC atinja em todas as peças os 165°C. O critério usado foi o tempo necessário para que todos os termopares atingissem pelo menos 165°C. Como era espectável, os moldes mais pesados possuem um tempo de aquecimento maior.

Tabela 14: Tempo necessário para aquecimento do molde.

Contentor	Câmara de vapor (dm <sup>3</sup> )		Medida	Massa do molde (kg)	Tempo de aquecimento (T <sub>ref</sub> - 165°C)
	Cone	Placa			
<b>EGS</b>	2,5	4,5	195/55 R16	287	2h e 10min
	6,7	5,2	225/60 R16	423	2h e 30min
<b>EGV</b>	6,7	5,2	225/55 R17	428	2h e 30min
	6,7	5,2	225/40 R18	334	2h e 28min
<b>EGX</b>	7,6	8	275/40 R18	527	4hr e 00min
	7,6	8	295/25 R20	506	3hr e 45min
<b>EG43</b>	12,6	7,5	205/80 R16	483	2hr e 53min

Passando agora para os testes efectuados em contentor sem câmara de vapor na placa inferior, ver gráfico da Figura 61, observa-se que a evolução da temperatura ao longo do tempo é mais uniforme, em comparação com os resultados obtidos até agora. Verifica-se que os segmentos (Ponto 3) são as peças com o aquecimento mais rápido, enquanto que o anel do talão inferior (Ponto 5) é o que possui o aquecimento mais lento.

Quando se realiza o aquecimento neste tipo de contentores, usam-se as câmaras de vapor que existem no prato superior e inferior da prensa (ver Figura 19.b da página 46), de modo a fornecer a energia na parte inferior e superior do conjunto MC.

Como observa-se no gráfico da Figura 61, é a parte inferior do conjunto MC onde se regista as temperaturas mais baixas. Já os segmentos possuem as temperaturas mais altas devido a estarem próximas da câmara de vapor existente no cone do contentor, assim como, não existir tantas perdas de calor como se observa no resto dos pontos de medição.

Um fenómeno que não se observou neste teste, foi a existência de pico de temperatura como se observou nos testes realizados em medidas montadas nos contentores com duas câmaras de vapor. Este fenómeno não se verificou nestes contentores por causa dos segmentos possuírem as temperaturas mais altas, e como foi dito anteriormente, é a partir da leitura da temperatura dos segmentos que o sistema vai regula a abertura da válvula de vapor. Sendo assim, nunca se vai ter temperaturas superiores à dos segmentos. Quando o modo “aquecimento de moldes” se desliga, o aquecimento do molde ainda não está concluído, verificando-se temperatura no valor de 155°C.

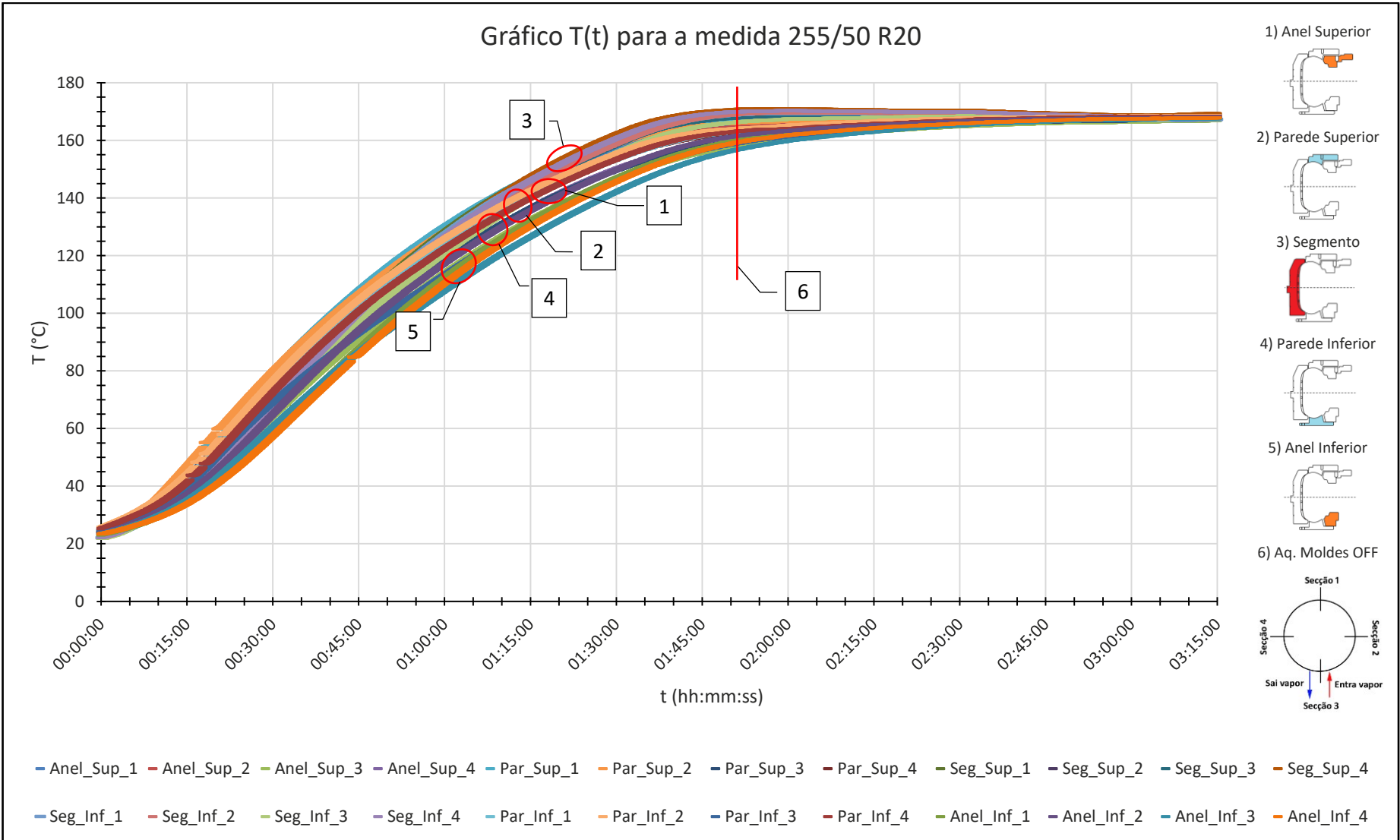


Figura 61:Gráfico T(t) da medida 255/50 R20 montado no contentor G46.

Tabela 15: Tempo necessário para aquecimento do molde.

Contentor	Câmara de vapor (dm <sup>3</sup> )	Medida	Massa do molde (kg)	Tempo de aquecimento (T <sub>ref</sub> - 165°C)
G46	15,2	265/65 R17	498	Sem sucesso
		255/50 R20	505	2hr e 30min

Na Tabela 15 encontra-se o tempo necessário para que seja atingida a temperatura mínima de 165°C. O conjunto MC com a medida 265/65 R17 não se conseguiu efectuar o teste por causa de os fios se terem partido no momento de fechar o conjunto MC na prensa.

Com base nos gráficos anteriores, Figura 54 até Figura 60 (aquecimento segundo a Figura 19.a) e Figura 61 (aquecimento segundo a Figura 19.b), pode-se afirmar que o aquecimento das peças é mais uniforme no caso do aquecimento segundo a Figura 19.b, pois há uma massa maior de MC interposta entre a fonte de aquecimento da placa inferior da prensa e essa peça, o que tende a homogeneizar a temperatura em relação ao tipo de aquecimento segundo a Figura 19.a.

#### 4.4 Ajuste do polinómio $T=T(t)$

O ajuste do polinómio  $T=T(t)$  é feito com os valores dos testes feitos ao aquecimento na prensa, devido a este ser o método de aquecimento do conjunto MC mais rápido e eficiente. Para este ajuste é utilizado os cálculos feitos no tópico Regressão por mínimos quadrados [19], da página 62.

Com recurso a folhas de cálculo, obtiveram-se os seguintes valores para  $A$  (equação (24)),  $B$  (equação (25)) e  $C$  (equação (26)), e que contam nas Tabela 16, Tabela 17, Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20.

Tabela 16: Valores calculados do  $A$ ,  $B$  e  $C$  para a medida 195/55 R16 montada no contentor EGS

		Anel superior	Parede superior	Segmento (ponto superior)	Segmento (ponto inferior)	Parede inferior	Anel inferior
195/55 R16	A	-0,205	-0,208	-0,527	-0,512	-0,870	-0,968
	B	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	-0,004	-0,004
	C	$5,100 \times 10^{-12}$	$5,200 \times 10^{-12}$	$1,100 \times 10^{-11}$	$1,100 \times 10^{-11}$	$1,910 \times 10^{-11}$	$1,980 \times 10^{-11}$

Tabela 17: Valores calculados de  $A$ ,  $B$  e  $C$  para as medidas 225/40 R18, 225/55 R17 e 225/60 R16 montadas no contentor EGV

		Anel superior	Parede superior	Segmento (ponto superior)	Segmento (ponto inferior)	Parede inferior	Anel inferior
225/60 R16	A	-0,201	-0,200	-0,413	-0,432	-0,670	-0,799
	B	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	-0,003	-0,003
	C	$4,800 \times 10^{-12}$	$5,100 \times 10^{-12}$	$8,500 \times 10^{-12}$	$8,840 \times 10^{-12}$	$1,380 \times 10^{-11}$	$1,560 \times 10^{-11}$
225/55 R17	A	-0,019	0,009	-0,680	-0,709	-0,942	-1,074
	B	0,000	0,000	-0,003	-0,003	-0,004	-0,004
	C	$2,214 \times 10^{-12}$	$1,930 \times 10^{-12}$	$1,374 \times 10^{-11}$	$1,441 \times 10^{-11}$	$2,007 \times 10^{-11}$	$2,165 \times 10^{-11}$
225/40 R18	A	-0,199	-0,192	-0,487	-0,440	-0,801	-0,788
	B	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	-0,003	-0,003
	C	$4,600 \times 10^{-12}$	$4,500 \times 10^{-12}$	$9,700 \times 10^{-12}$	$9,080 \times 10^{-12}$	$1,630 \times 10^{-11}$	$1,570 \times 10^{-11}$

Tabela 18: Valores calculados de  $A$ ,  $B$  e  $C$  das medidas 275/40 R18 e 295/25 R20 montadas no contentor EGX

		Anel superior	Parede superior	Segmento (ponto superior)	Segmento (ponto inferior)	Parede inferior	Anel inferior
275/40 R18	A	$1,200 \times 10^{-05}$	$7,000 \times 10^{-06}$	$7,800 \times 10^{-05}$	$7,510 \times 10^{-05}$	$9,560 \times 10^{-05}$	$1,270 \times 10^{-04}$
	B	$-1,000 \times 10^{-04}$	$-1,000 \times 10^{-04}$	$-2,000 \times 10^{-04}$	$-2,400 \times 10^{-04}$	$-4,500 \times 10^{-04}$	$-3,700 \times 10^{-04}$
	C	$1,500 \times 10^{-12}$	$1,600 \times 10^{-12}$	$2,200 \times 10^{-12}$	$2,710 \times 10^{-12}$	$4,960 \times 10^{-12}$	$4,110 \times 10^{-12}$
295/25 R20	A	-0,105	-0,108	-0,377	-0,370	-0,422	-0,644
	B	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002	-0,002	-0,003
	C	$2,800 \times 10^{-12}$	$2,900 \times 10^{-12}$	$7,500 \times 10^{-12}$	$7,590 \times 10^{-12}$	$1,040 \times 10^{-11}$	$1,330 \times 10^{-11}$

Tabela 19: Valores calculados de  $A$ ,  $B$  e  $C$  da medida 205/80 R16 montadas no contentor EG43

		Anel superior	Parede superior	Segmento (ponto superior)	Segmento (ponto inferior)	Parede inferior	Anel inferior
205/80 R16	A	-0,115	-0,090	-0,302	-0,262	-0,316	-0,502
	B	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,002	-0,002
	C	$3,900 \times 10^{-12}$	$3,600 \times 10^{-12}$	$7,200 \times 10^{-12}$	$6,720 \times 10^{-12}$	$1,000 \times 10^{-11}$	$1,180 \times 10^{-11}$

Tabela 20: Valores calculados de  $A$ ,  $B$  e  $C$  da medida 255/50 R20 montadas no contentor G46

		Anel superior	Parede superior	Segmento (ponto superior)	Segmento (ponto inferior)	Parede inferior	Anel inferior
255/50 R20	A	-0,218	-0,200	-0,236	-0,236	-0,189	-0,226
	B	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001
	C	$5,100 \times 10^{-12}$	$4,900 \times 10^{-12}$	$5,400 \times 10^{-12}$	$5,400 \times 10^{-12}$	$4,600 \times 10^{-12}$	$5,100 \times 10^{-12}$

Para compreender se estes valores obtidos são válidos, quantificou-se o erro existente entre os valores medidos e os valores calculados. Para isso determinou-se o desvio padrão ( $S_{y/x}$ ) pela equação (33) e os coeficientes de determinação ( $r^2$ ), pela equação (34), e de correlação ( $r$ ), pela equação (36). Nas Tabela 21, Tabela 22, Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25 estão os valores da quantificação do erro. As peças indicadas nestas tabelas estão representadas na Figura 13.

Tabela 21: Valores de  $S_{y/x}$ ,  $r^2$  e  $r$  da medida 195/55 R16, contentor EGS

		Anel superior	Parede superior	Segmento (ponto superior)	Segmento (ponto inferior)	Parede inferior	Anel inferior
195/55 R16	$S_{y/x}$	1,985	1,786	3,297	3,075	5,951	6,662
	$r^2$	0,998	0,998	0,994	0,994	0,965	0,963
	$r$	0,999	0,999	0,997	0,997	0,983	0,981

Tabela 22: Valores de  $S_{y/x}$ ,  $r^2$  e  $r$  das medidas 225/40 R18, 225/55 R17 e 225/60 R16, contentor EGV

		Anel superior	Parede superior	Segmento (ponto superior)	Segmento (ponto inferior)	Parede inferior	Anel inferior
225/40 R18	$S_{y/x}$	2,517	2,748	3,203	3,574	5,348	6,703
	$r^2$	0,997	0,996	0,995	0,994	0,981	0,972
	$r$	0,998	0,998	0,998	0,997	0,991	0,986
225/55 R17	$S_{y/x}$	1,854	1,542	2,693	2,211	2,942	3,932
	$r^2$	0,998	0,998	0,995	0,997	0,991	0,985
	$r$	0,999	0,999	0,998	0,998	0,995	0,992

<b>225/60 R16</b>	$S_{y/x}$	2,627	2,256	1,711	3,317	3,938	3,816
	$S_{y/x}$	0,996	0,997	0,998	0,993	0,985	0,988
	$r^2$	0,998	0,998	0,999	0,997	0,993	0,994

Tabela 23:Valores de  $S_{y/x}$ ,  $r^2$  e  $r$  das medidas 275/40 R18 e 295/25 R20, contentor EGX

		Anel superior	Parede superior	Segmento (ponto superior)	Segmento (ponto inferior)	Parede inferior	Anel inferior
<b>275/40 R18</b>	$S_{y/x}$	1,505	1,053	6,322	5,333	5,087	6,831
	$r^2$	0,997	0,999	0,956	0,964	0,958	0,936
	$r$	0,999	0,999	0,978	0,982	0,979	0,967
<b>295/25 R20</b>	$S_{y/x}$	1,054	1,149	2,364	2,516	3,129	3,673
	$r^2$	0,999	0,999	0,996	0,996	0,988	0,985
	$r$	1,000	1,000	0,998	0,998	0,994	0,992

Tabela 24:Valores de  $S_{y/x}$ ,  $r^2$  e  $r$  da medida 205/80 R16, contentor EG43

		Anel superior	Parede superior	Segmento (ponto superior)	Segmento (ponto inferior)	Parede inferior	Anel inferior
<b>205/80 R16</b>	$S_{y/x}$	4,562	4,238	2,483	2,085	4,355	4,389
	$r^2$	0,987	0,988	0,996	0,997	0,978	0,982
	$r$	0,993	0,994	0,998	0,999	0,989	0,991

Tabela 25:Valores de  $S_{y/x}$ ,  $r^2$  e  $r$  da medida 255/80 R20, contentor G46

		Anel superior	Parede superior	Segmento (ponto superior)	Segmento (ponto inferior)	Parede inferior	Anel inferior
<b>255/80 R20</b>	$S_{y/x}$	1,514	1,557	1,854	2,078	2,066	1,457
	$r^2$	0,999	0,999	0,998	0,998	0,998	0,999
	$r$	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	1,000

Observando para o ajuste feito em cada peça, é no anel do talão superior e na parede superior que a equação aqui desenvolvida representa um melhor ajuste com os valores medidos. Já no anel do talão inferior e na parede inferior, a equação não consegue ajustar-se tão bem, devido ao pico de temperatura que existe aquando o aquecimento do conjunto MC. No segmento, tanto no ponto superior como no ponto inferior, a equação consegue traduzir bem a evolução da temperatura ao longo do tempo, havendo um coeficiente de determinação médio de 0,9914.

Sendo assim pode-se concluir que os valores calculados pelo modelo apresentado traduz, em média, 98,88% da incerteza original. Ou seja, que a equação aqui desenvolvida, os resultados obtidos representam um ajuste bom.

Contudo, estes são valores específicos para os moldes testados. O tempo necessário de aquecimento de todas as medidas e contentores existentes na CMIP pode ser calculado a partir dos valores que se seguem. Dentro desses valores conhecesse os seguintes:

- Massa dos contentores e moldes;
- Dimensões dos moldes;
- Dimensões dos contentores a utilizar;
- Calor específico dos materiais;
- Emissividade dos materiais;
- Propriedades termofísicas da água a determinada pressão;

Já os valores desconhecidos são os seguintes:

- Coeficiente de convecção para cada peça;
- Potência térmica fornecida pelo vapor para o aquecimento de cada peça do conjunto MC;

Estes dois valores desconhecidos podem ser obtidos a partir dos valores  $A$ ,  $B$  e  $C$  contidos na Tabelas Tabela 16 até Tabela 20 por intermédio das equações(24), (25) e (26), que são resolvidas a estas incógnitas dá:

$$\zeta_{peça} \cdot \dot{m} = \frac{\alpha \cdot \epsilon_{peça} \cdot A_{sup\_peça} \cdot (T_{sur})^4}{m_{peça} \cdot c_{peça}} - \frac{h \cdot A_{sup\_peça} \cdot (T_{ar})}{m_{peça} \cdot c_{peça}} \quad (37)$$

$$A_{sup\_peça} = \frac{C \cdot m_{peça} \cdot c}{\sigma \cdot \epsilon_{peça}} \quad (38)$$

$$h = \frac{B \cdot m_{peça} \cdot c}{A_{sup\_peça}} \quad (39)$$

Em que  $A_{sup\_peça}$  é conhecido e o valor  $\zeta_{peça} \cdot \dot{m}$  representa a percentagem total de vapor que passa no conjunto MC e que é utilizado no aquecimento de dada peça neste conjunto. A partir destes cálculos, é possível os novos valores para  $A$ ,  $B$  e  $C$  de forma a calcular o  $dT/dt$  e depois o tempo necessário para cada peça do conjunto MC atingir uma determinada temperatura.

## 4.5 Propostas de melhoria

### 4.5.1 Mesa de aquecimento

Com base das análises feitas no capítulo 4.2.2, pode-se afirmar que a mesa de aquecimento no estado actual é um grande consumidor de energia. De forma a melhorar, deve-se construir um equipamento semelhante a uma prensa de forma a obter a curva de aquecimento das peças do conjunto MC experimentalmente. Este equipamento torna possível um aumento de eficiência da mesa de aquecimento. Sendo assim, a mesa de aquecimento deve possuir:

- Placas com câmara de vapor (Peça C e D, Figura 62.b);
- Isolamentos térmico em volta do contentor (Peça B, Figura 62.a);
- Possibilidade de aplicar uma força de aperto (Peça A, Figura 62.a).

Na Figura 62.a e na Figura 62.b está uma maquete de como deveria ser a mesa de aquecimento de forma a obter as mesmas curvas de aquecimento obtidas experimentalmente na prensa.

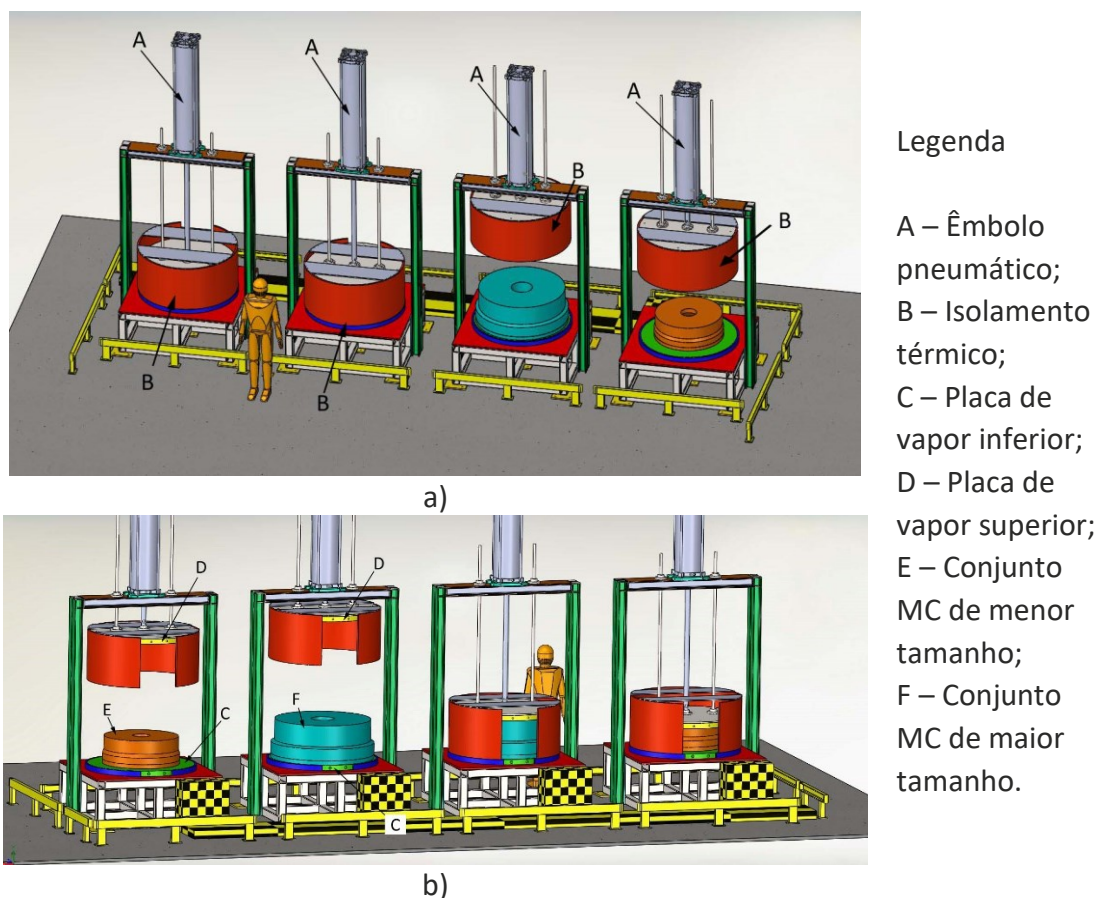


Figura 62: Exemplo de uma possível mesa de aquecimento: a) vista frontal, b) vista de trás.

As placas com câmara de vapor (peça C e E da Figura 62.b) devem fornecer calor às paredes (peça 2 e 4 da Figura 13) e aos anéis do talão (peça 1 e 5 da Figura 13) de forma a reduzir a diferença de temperaturas que se registou entre estas peças e os segmentos. Já o isolamento térmico (peça B da Figura 62.b) diminui as perdas por convecção e radiação, assim como aumenta a segurança dos operadores.

Com base do estudo de uma proposta de melhoria da prensa, ver capítulo 4.5.2, verifica-se que a aplicação de uma força de aperto durante o aquecimento torna o aquecimento muito mais rápido. Sendo assim é também recomendável que o novo equipamento para a substituição da mesa de aquecimento possua a possibilidade de aplicar uma força de aperto sobre o molde, neste caso, através de um êmbolo pneumático (peça A da Figura 62.a).

#### 4.5.2 Prensa

No aquecimento de moldes na prensa, observa-se um aquecimento lento na parede superior e no anel do talão superior. Isto significa que existe uma resistência de contacto entre o prato superior da prensa e a parte superior do contentor, podendo estar associada aos seguintes factores:

- Oxidação das duas superfícies;
- Baixa área de contacto entre as peças do molde;
- Mau contacto entre a parte superior do conjunto MC e o prato superior da prensa.

De forma a reduzir esta resistência de contacto, foi proposto à CMIP um teste em que durante o aquecimento do molde se aplica uma força de aperto. Para comparar a eficácia desta recomendação foi feito o aquecimento do molde sem força de aperto e com força de aperto. As medidas utilizadas foram as seguintes:

- 255/50 R20, contentor G46;
- 205/80 R16, contentor EG43.

Como foi concluído no capítulo 4.3, a variação da temperatura segundo  $\theta$  é muito baixa, podendo-se analisar as temperaturas médias de cada peça. De forma a não danificar o molde, foi aplicado uma força de aperto inicial de 10 toneladas.

Começando pelo teste efectuado num contentor com duas câmaras, é possível observar que a diminuição de tempo necessário para aquecer o molde é considerável.

No gráfico seguinte, ver Figura 63, as linhas que se encontram a laranja dizem respeito ao aquecimento sem força de aperto; as linhas a azul ao aquecimento com força de aperto. Numa análise muito simples ao gráfico, observa-se que a parede superior e o anel superior do talão – Pontos 1 e 2- apresentam uma redução significativa do tempo necessário para atingir a mesma temperatura,  $T_{\text{molde}}=165^{\circ}\text{C}$ , sendo que no teste sem pressão (linhas laranjas) é necessário cerca de 2h45 enquanto no teste com pressão (linhas a azul) é necessário 1h20. Isto representa uma diminuição de 1h25 no processo de aquecimento do molde na prensa.

Esta diminuição do tempo necessário para o aquecimento está relacionada com o facto de se estar a aplicar uma força de aperto sobre o conjunto MC.

Na Figura 64.a está um conjunto MC sem força de aperto. Observa-se uma folga entre as peças, diminuindo assim a transmissão de calor entre os segmentos e as paredes do molde. Ao aplicar força de aperto, ver Figura 64.b, esta folga deixa de existir, aumentando assim a área de contacto entre as peças do conjunto MC e entre os pratos da prensa e o conjunto MC. Isto leva a uma maior transmissão de calor entre as peças.

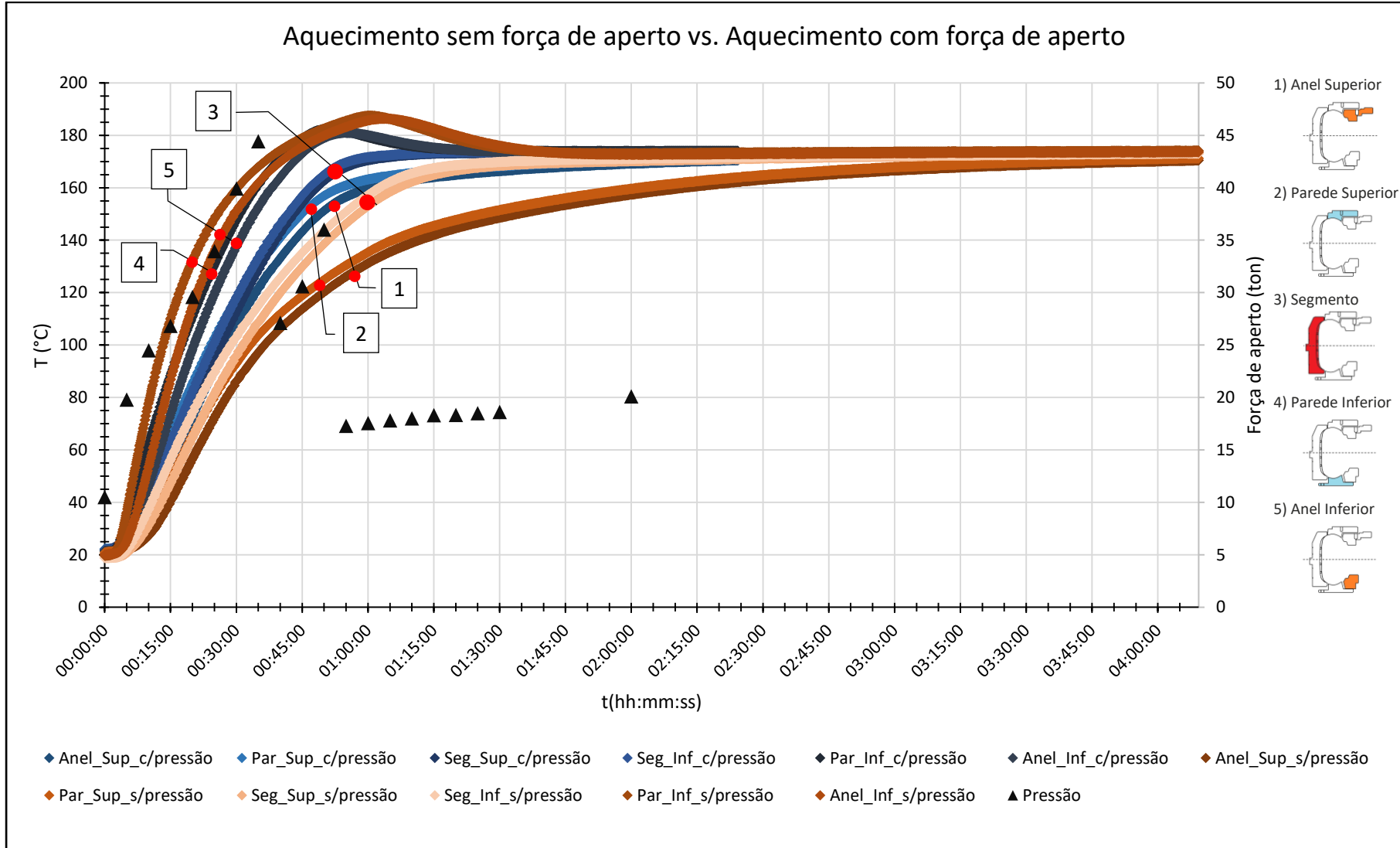


Figura 63: Gráfico da temperatura média do aquecimento sem pressão vs. aquecimento com pressão, para contentores com câmara de vapor inferior.

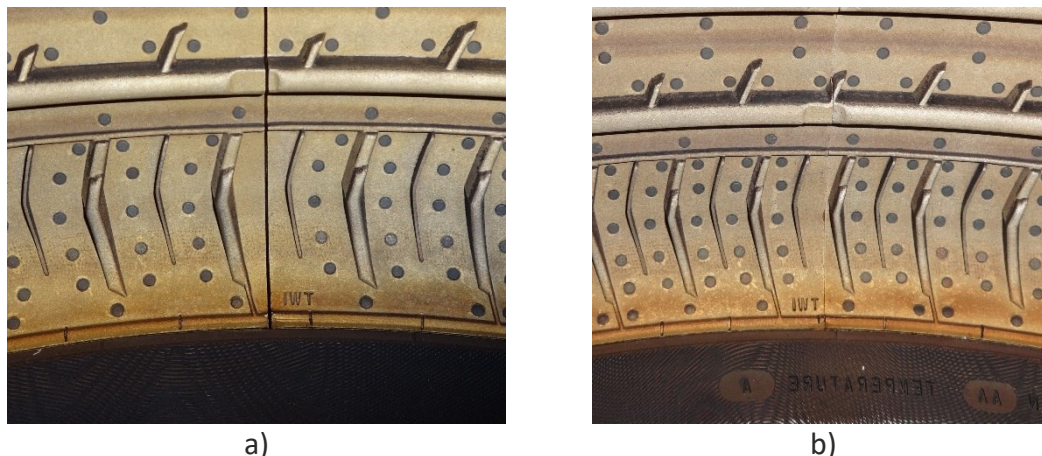


Figura 64: Conjunto MC fechado: a) segmentos separados, b) segmentos juntos.

No teste com força de aperto observou-se este mesmo acontecimento. As curvas de aquecimento dos segmentos (Ponto 3), da parede inferior (Ponto 4) e do anel do talão inferior (Ponto 5) não atingem temperaturas tão altas quando comparadas com o mesmo teste feito sem força de aperto, significando assim que existe uma melhor transmissão de calor entre as peças. Observa-se também que a evolução da temperatura nestas peças é mais uniforme no teste com força de aperto do que no teste sem força de aperto.

Analisando agora o teste efectuado com um molde montado num contentor sem câmara de vapor na placa inferior, também se verifica uma redução do tempo necessário para efectuar o aquecimento do conjunto MC.

No gráfico seguinte, ver Figura 65, as linhas que se encontram a laranja pertencem ao aquecimento sem força de aperto; as linhas a azul ao aquecimento com força de aperto. Examinando o gráfico depara-se com uma redução do tempo de aproximadamente 30min. Este ganho foi mais modesto que o anterior devido a existir uma oscilação da força de aperto muito grande, provocando assim uma variação da área de contacto entre as peças.

Mesmo havendo esta variação da força de aperto, observou-se alguns fenómenos interessante nos dois testes. Olhando para o teste do aquecimento sem força de aperto (linhas a laranja) verifica-se que a peça do molde com o aquecimento mais rápido são os segmentos (Ponto 3), e com o aquecimento mais lento o anel do talão inferior (Ponto 5). Isto demonstra que existe uma grande resistência de contacto entre a parte inferior do conjunto MC e o prato inferior da prensa. Já os segmentos registaram temperaturas mais altas devido à câmara de vapor do cone que se encontra junto a esta peça.

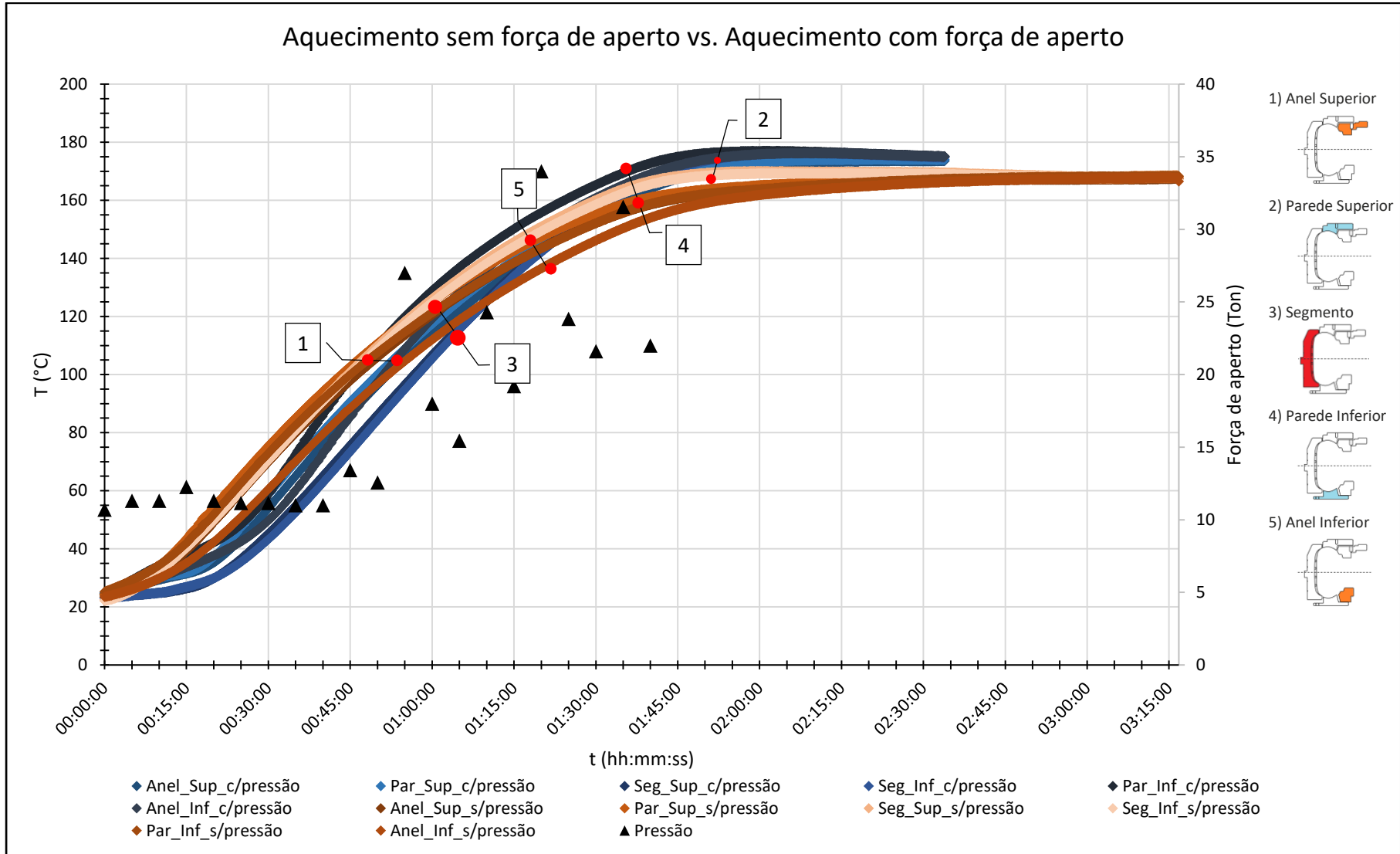


Figura 65: Gráfico da temperatura média do aquecimento sem pressão vs. aquecimento com pressão, para um contentor sem câmara de vapor inferior (G46).

Já no teste do aquecimento com força de aperto (linhas a azul) obteve-se o inverso: os segmentos (Ponto 3) foram a parte do molde que demoraram mais tempo a aquecer, enquanto o anel do talão e parede inferior já as peças do molde com o aquecimento mais rápido.

Isto significa que a aplicação de uma força de aperto durante o aquecimento vai, novamente, aumentar o contacto entre as peças as peças do molde (segmentos e paredes), como também, vai aumentar a área de contacto do conjunto MC com os pratos da prensa, havendo assim, uma maior homogeneização das temperaturas nas diferentes peças do conjunto MC.

Contudo é preciso ter alguns cuidados ao utilizar este tipo de procedimento, desde logo, a dilatação do conjunto MC com a temperatura. Observando o gráfico da Figura 63, verifica-se um aumento da força de aperto de 34 Ton durante 1h35, tendo depois sido diminuída manualmente.

De forma a minimizar este risco é necessário reprogramar o programa “aquecimento de moldes” através na introdução de mais um parâmetro de controlo, neste caso a força total de aperto. Com isto a prensa ajustava automaticamente a força de aperto ao longo do tempo de aquecimento, de forma a diminuir o risco de se atingir valores de força de aperto altos e que sejam incomportáveis pelos conjuntos MC.

Outro factor que também se deve ter em atenção é o stress térmico que o conjunto pode sofrer com o rápido aquecimento, podendo criar distorções no material e originar assim pneus com defeitos.

Em termos de ganhos, a implementação deste procedimento no aquecimento de moldes pode significar numa redução de 52% dos custos com o consumo de vapor durante o aquecimento de um molde montado num contentor EG43. Já com um molde montado num contentor G46, esta redução de tempo será de 25,6%.



# 5. CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

5.2 Trabalhos futuros



## 5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

A temperatura correcta dos moldes para a vulcanização dos pneus tem uma importância relevante. Se iniciar a vulcanização de um pneu em que molde teve um aquecimento insuficiente, a vulcanização do pneu vai ser imperfeita, deixando o pneu com zonas onde a borracha vai estar “crua”.

De forma a contornar este problema, neste trabalho realizaram-se medições nos dois dispositivos existentes na CMIP onde é possível realizar o pré-aquecimento dos moldes: mesa de aquecimento e prensa.

Com o recurso a termopares, mediu-se o campo de temperatura nas diferentes peças do molde, em diferentes contentores na mesa de aquecimento, como também na prensa e deparou-se com aquecimentos diferentes.

Na mesa de aquecimento, ao fim de 4h de aquecimento, as temperaturas registadas nos segmentos estavam na ordem dos 145/165°C, enquanto nas paredes e nos anéis do talão as temperaturas registadas não ultrapassavam os 135°C. Este fraco aquecimento deve-se essencialmente a não existir isolamento térmico em volta do conjunto MC, assim como, ser só a câmara de vapor que existe no cone do contentor a fornecer energia térmica as peças do molde.

Já na prensa, observa-se um aquecimento mais rápido e mais eficiente quando comparado com a mesa de aquecimento. Nos testes feitos em contentores com câmara de vapor na placa inferior, depara-se com um aquecimento lento da parede e do anel do talão superior, sendo nestas peças onde se detecta mais imperfeições nos pneus. Já a parede e o anel do talão inferior foram as peças em que se registou um aquecimento rápido, sendo este causado por causa da proximidade destas peças com a câmara de vapor existente na placa inferior do contentor. Já nos testes efectuados na prensa com os contentores sem câmara de vapor na placa inferior verifica-se um aquecimento uniforme entre as peças.

Após a recolha e análise dos dados, criou-se um modelo que descreve de uma forma mais aproximada, o aquecimento nas prensas, de forma a ser possível prever o tempo necessário de aquecimento.

De forma a reduzir o tempo de aquecimento nas prensas, foram efectuados dois testes em que é aplicado uma força de aperto durante o aquecimento. Observou-se que para moldes montados nos contentores que possuem câmara de vapor na placa inferior, registou-se uma diminuição do tempo de 1h40.

Já nos contentores que não possuem câmara de vapor na placa inferior, a diminuição do tempo foi na ordem dos 35min. Isto comprova que a transmissão de calor entre as peças do molde, contentor e prensas não é eficiente, provocando assim consumos desnecessário de tempo e vapor para realizar o aquecimento.

## 5.2 Trabalhos futuros

Para trabalho futuro seria interessante projectar uma estrutura que substituísse a actual mesa de aquecimento de moldes.

Também seria interessante a utilização de modelos de diferenças finitas de forma a realizar simulações do pré-aquecimento de moldes, assim como, perceber até que ponto o modelo construído neste trabalho descreve, ou não, os processos de transferência de calor, como também se o erro de previsão do tempo necessário para aquecimento é confiável ou não.

Outro ponto que também merecia uma maior dedicação é o do estudo mais aprofundado do procedimento da aplicação de uma força de aperto durante o aquecimento de molde, assim como, o desenvolvimento da reprogramação do modo “aquecimento de moldes” que existe em todas as prensas.

## **6. BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO**



## 6 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] «Intranet Continental-Mabor». .
- [2] R. Neves, «Continental Mabor com lucros de 243 milhões», *J. Negócios*, 2016.
- [3] A. Correia, «Estas são as empresas portuguesas que mais exportam», *Visão*, 2015.
- [4] Continental Reifen, «Tyre Basics: Passenger Car Tyres», *Tdc 06/2008*, 2013. [Em linha]. Disponível em: <https://www.continental-tires.com/car/media-services/downloads>. [Acedido: 21-Mar-2017].
- [5] Continental AG, «Technical Databook 2017 · 2018», 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://www.continental-tires.com/car/media-services/downloads>. [Acedido: 21-Mar-2017].
- [6] C. T. the Americas, «ContiPremiumContact™ 2». [Em linha]. Disponível em: <http://www.continentaltire.com/product/contipremiumcontact-2-19555r16-87v-0>. [Acedido: 21-Mar-2017].
- [7] E. G. Pinheiro, «Modelos numéricos aplicados à Vulcanização de Pneus.», Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.
- [8] Wikipédia, «Vulcanization», 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Vulcanization>. [Acedido: 15-Mar-2017].
- [9] H. A. Bhowmick, A. K., Hall, M.M., Benarey, *Rubber Products Manufacturing Technology*. Kharagpur, India: CRC Press, 1994.
- [10] Continental AG, «Press kit Continental TechnikForum 2015», 2015. [Em linha]. Disponível em: <https://www.continental-tires.com/car/media-services/downloads>. [Acedido: 20-Mar-2017].
- [11] D. Moulage, «Tire Molds», 2016. [Em linha]. Disponível em: <http://www.deshors-tiremold.com/fr/products/tire-mold/>. [Acedido: 10-Jan-2017].
- [12] Tauform, «Tyre Curing Containers», 2010. [Em linha]. Disponível em: <http://www.tauform.hu/en-product-curing-containers.php>. [Acedido: 10-Jan-2017].
- [13] J. Morgado, Ed., *Boletim da Sociedade Portuguesa de Quimica*. Lisboa, 2008, pp. 32–36.
- [14] J. P. Coelho, «Sensores e actuadores», 2005. [Em linha]. Disponível em: [http://www.ipb.pt/~jpcoelho/downloads/SeA\\_.pdf](http://www.ipb.pt/~jpcoelho/downloads/SeA_.pdf). [Acedido: 17-Fev-2017].

- [15] M. Piedade, «Efeitos Termoelétricos e Suas Aplicações», 1997. [Em linha]. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/216208217/SensoresTempredII>. [Acedido: 16-Fev-2017].
- [16] Omega, «Thermocouple Tolerance Values». [Em linha]. Disponível em: [www.omega.com/temperature/pdf/tc\\_colorcodes.pdf](http://www.omega.com/temperature/pdf/tc_colorcodes.pdf). [Acedido: 15-Fev-2017].
- [17] J. C. P. L. da Costa, *Transferência de Calor - Apontamentos*. 2015.
- [18] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, e D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfers*, Seventh ed. Jefferson City: Don Fowley, 2008.
- [19] S. C. Chapra e R. P. Canale, *Métodos Numéricos para Engenharia*, Quinta., vol. 1. Porto Alegre: AMGH, 2008.
- [20] Stauber, «1.0570 - Werkstoff 1.0570 datenblatt». [Em linha]. Disponível em: <https://www.stauberstahl.com/werkstoffe/10570-werkstoff-datenblatt/>. [Acedido: 18-Jan-2017].
- [21] Mikron Instrument Company, «Table of Emissivity of Various Surfaces», 2014. [Em linha]. Disponível em: [http://www.czlazio.com/tecnica/Tabella delle Emissività.pdf](http://www.czlazio.com/tecnica/Tabella_delle_Emissivita_.pdf). [Acedido: 22-Jan-2017].
- [22] A.-A. S. Inc., «Aluminum 5083-H112». [Em linha]. Disponível em: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5083H112>. [Acedido: 18-Jan-2017].
- [23] «Informações técnicas - Aplicações água quente e vapor». [Em linha]. Disponível em: [http://www.asconumatics.eu/images/site/upload/\\_pt/pdf1/00099pt.pdf](http://www.asconumatics.eu/images/site/upload/_pt/pdf1/00099pt.pdf). [Acedido: 16-Jan-2017].

# 7. ANEXOS

- 7.1 Anexo 1
- 7.2 Anexo 2
- 7.3 Anexo 3



## 7 ANEXOS

### 7.1 Anexo 1

No Anexo 1 é exposto todo o material utilizado para a recolha de dados, assim como as características técnicas de cada componente.

#### 7.1.1 Aquisição de dados

Para este teste é necessário recolher e armazenar um número considerável de valores medidos. Para suprir esta necessidade utilizou-se um sistema de aquisição de dados.

O sistema utilizado possui as seguintes características técnicas:

- *Datalogger Agil II 80C535*, da marca AIS, com compensação directa de junta fria e auto-zero, para ligação directa de termopares. Possui 32 canais analógicos de entrada para termopares, 8 canais de entrada digital e 8 canais de saída digital.
- Computador *HP Compact nc6400*, modelo *HSTNN-C18C*, com processador Intel Core 2 de 1.66 GHz e 1 GB de memória RAM, para efectuar a recolha e armazenamento dos dados provenientes do *datalogger*;

Usaram-se as seguintes plataformas informáticas para a recolha e análise dos dados:

- *Windows XP Professional*, da *Microsoft*;
- *Software Measure*, da *AIS*;
- *Software Exploit*, da *AIS*;
- *Microsoft Office Excel 2007*.



a)



b)

Figura 66: Equipamento para recolha de dados: a) *dataLogger Agil II 80C535*. b) computador *HP Compact nc6400* com o software *Measure* a correr.

Os termopares utilizados são do tipo J, com isolamento em *Neoflon*. Este tipo de termopares aguenta com temperatura máxima de 260°C e possui um diâmetro de cada condutor de 0,25mm. O fio condutor negativo (cor vermelha) é de Constantan (Cu55%Ni45%), e o fio condutor com o isolamento preto (negativo) é Ferro (Fe 99,5%).

## 7.2 Anexo 2

O Anexo 2 diz respeito à confecção e calibração dos termopares utilizados para a recolha dos valores da temperatura das peças dos MC durante o aquecimento dos MC.

### 7.2.1 Confecção dos termopares

A confecção dos termopares é feita obedecendo o seguinte procedimento:

1. Obter 24 fios em que cada possui cerca de 10 metros. Numa das extremidades dos fios, descarnar e, com uma lixa, remover vestígios de material isolante. Montar estes mesmos fios às fichas existentes para depois ligar ao terminal (ver Figura 67).
2. Identificar ao longo de cada fio (a cada 3 m), com o número correspondente ao do terminal;

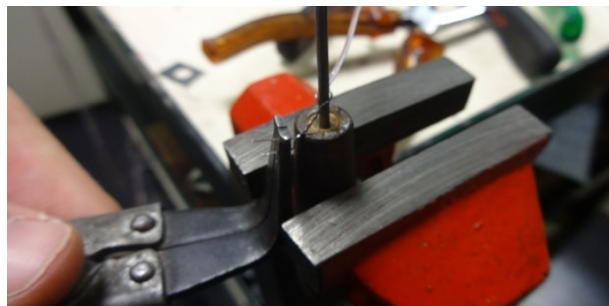


Figura 67: Fios termopar ligados ao terminal.

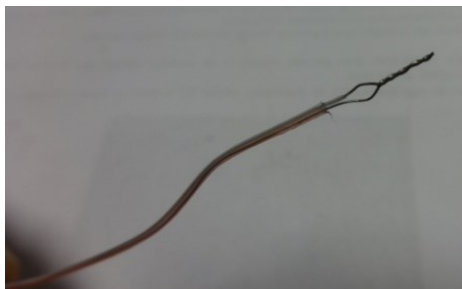
3. Na extremidade oposta, descarnar e remover o excedente de isolante com recurso a uma lixa (ver Figura 68.a). Contruir um ponto de união entre os fios (ver Figura 68.b) e soldá-la (ver Figura 68.b).



a)



b)



c)

Figura 68: Confecção dos termopares: a) fios decapados; b) criação do ponto de união; c) termopar finalizado.

### 7.2.2 Calibração dos termopares

Após a confecção dos termopares, deve-se realizar uma calibração de forma a minimizar erros que possam existir. Para isso procedeu-se da seguinte maneira:

1. Aquecer o calibrador de temperatura até à temperatura de 170°C. Ligar o *datalogger* e o computador com o software *Measure*, para visualizar as temperaturas.
2. Quando a temperatura do calibrador se estabilizar, inserir os fios no túnel (ver Figura 69) e registar os valores lido pelo *datalogger* durante 15 minutos.

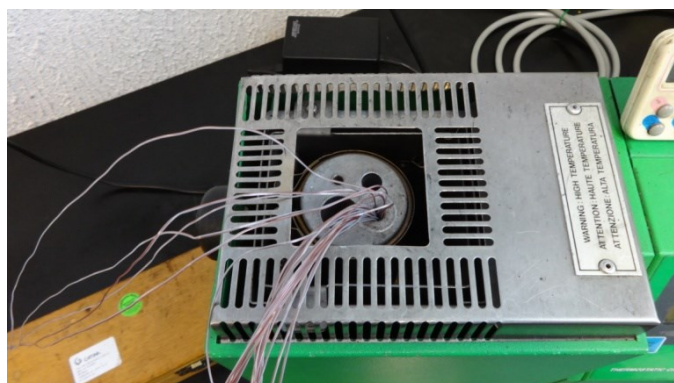


Figura 69: Fios do termopar inseridos no túnel.

3. Ao fim de 15 minutos, proceder à compensação ou descompensação dos valores lidos pelo *datalogger*. Esta compensação é feita de for registado uma diferença de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  em relação à temperatura de referência. Na Tabela 26, está um exemplo da calibração de um termopar.

Tabela 26: Exemplo de calibração dos termopares.

Temperatura de referência	Valor lido no <i>datalogger</i>	Valor a incrementar/ diminuir
170,0°C	169,3°C	+0,7°C

### 7.3 Anexo 3

Neste anexo estão presentes os valores termofísicos assumidos para as seguintes peças:

- Anéis do talão;
- Segmentos;
- Paredes;
- Contentor.

Também estão aqui incluídas as propriedades do vapor à entrada e saída do contentor.

#### 7.3.1 Liga de alumínio

Neste tópico estão as características termofísicas do material utilizado no fabrico dos segmentos, ver Tabela 27. Foi utilizado como liga de referência para todos os segmentos dos moldes, a liga de alumínio 3.3547.

Tabela 27: Características termofísicas da liga 3.3547.

Característica	
Massa volúmica, $\rho$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) [T=300K][20]	2660
Calor específico, $c$ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) [T=300K] [20]	900
Coeficiente de condutibilidade térmica, $k$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) [T=300K] [20]	117
Difusibilidade térmica, $\alpha$ ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) [T=300K] [18]	$73\times 10^{-6}$
Emissibilidade (T=473 K) [21]	0,11

#### 7.3.2 Liga de aço

A liga de aço utilizada como referência para todas as peças é liga de aço 1.0570 (St52-3). Esta liga de aço é utilizada nas seguintes peças: paredes, anéis do talão e em toda a estrutura do contentor. A Tabela 28 possui as características termofísicas da liga usada.

Tabela 28: Características termofísica da liga 1.0570.

Característica	
Massa volúmica, $\rho$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) [T=300K] [22]	7850
Calor específico, $c$ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) [T=300K] [22]	461
Coeficiente de condutibilidade térmica, $k$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) [T=300K] [22]	54
Difusibilidade térmica, $\alpha$ ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ) [T=300K] [18]	$10,9\times 10^{-6}$
Emissibilidade [T=473 K] [21]	0,57

### 7.3.3 Fluido térmico

O fluido utilizado para transportar energia térmica é a água. Esta vai entrar nos contentores na forma de vapor saturado seco, e sai na forma de líquido saturado. O fluido está a uma pressão de  $1750 \text{ kN.m}^{-2}$ . Na Tabela 29 estão todos os dados do vapor saturado seco e do líquido saturado à pressão  $1750 \text{ kN.m}^{-2}$ .

Tabela 29: Características termofísicas do líquido e vapor saturado [23] .

<b>Característica</b>	<b>Líquido saturado</b>	<b>Vapor saturado</b>
Temperatura, T (°C)	205,72	205,72
Massa volúmica, $\rho$ ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	857,889	8,816
Entalpia, h ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ )	878,3164	2795,2813
Volume específico, $\nu$ ( $\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$ )	0,001166	0,114