



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

# Caracterização do processo de arrefecimento do pêssego na fase de pós-colheita

**João Alexandre Martins Ferreira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Eletromecânica**

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinho Silva

Co-orientador: Prof. Doutor José Nunes

**Covilhã, outubro de 2016**



---

## Agradecimentos

Quero em primeiro lugar agradecer ao meu Orientador, Professor Doutor Pedro Dinho, pela oportunidade que me concedeu em trabalhar na presente dissertação. As suas indicações, motivação e apoio científico ao longo do presente ano letivo foram essenciais para a realização deste trabalho. E também na fase final, pela análise e correções feitas de forma a melhorar este trabalho.

Ao meu Co-Orientador, Prof. Doutor José Nunes agradeço a sua ajuda prestada e o seu tempo despendido na obtenção dos dados experimentais.

Ao meu pai, mãe, irmã, avós e tios agradeço todo o seu apoio, sacrifícios e investimento que fizeram em mim ao longo deste meu percurso académico. Foi a sua ajuda e motivação constante que me permitiram alcançar e ultrapassar esta etapa final. Ao meu pai agradeço pelas correções feitas na componente escrita deste trabalho e à minha mãe agradeço na ajuda quanto à organização do corpo do texto.

Aos meus colegas de curso e amigos, André, Daniel, Hugo, Martim e Simão um muito obrigado por todas as histórias de cariz épico, momentos bem passados, ajuda e motivação prestada ao longo do presente ano letivo e da nossa vida académica. Que venham mais jantares, pausas para café e “viagens” espontâneas à Serra.

Ao Bruno e ao Francisco agradeço o genuíno interesse demonstrado no tema da minha dissertação. O seu apoio “à distância” foi essencial para me manter motivado e nunca perder o ânimo.

Por fim, agradeço à Magui, a minha namorada, pelo seu apoio e incentivo constantes. Demonstrou ser portadora de uma paciência e compreensão infinitas, que eu muito admiro. A sua experiência académica e ajuda prestada foram-me essenciais para a realização deste trabalho. Sem a sua transmissão de força e constante reforço de motivação não teria chegado onde cheguei. Muito obrigado.



---

## Resumo

O constante e elevado crescimento da população a nível mundial põe em causa a sustentabilidade do planeta. Estima-se que no ano 2050 a população mundial atinja os 9,1 bilhões, sendo assim necessário um incremento na ordem dos 70% da produção alimentar de forma a sustentar o aumento populacional. A redução das perdas na fase de pós colheita é importante. Como um dos principais fatores que influenciam o tempo de vida das frutas e vegetais é a temperatura torna-se imperativo arrefecer estes o mais rapidamente possível após a sua colheita. O rápido arrefecimento de F&V na fase de pós-colheita é denominado de pré-arrefecimento, consistindo na rápida remoção do calor de campo dos produtos de forma a retardar os seus processos fisiológicos e assim estender o seu tempo de vida, preservando-os em quantidade e qualidade. A refrigeração de F&V tem sido constante alvo de estudo ao longo do tempo, sendo do máximo interesse o estudo de quanto tempo demoram os produtos a serem arrefecidos até à sua temperatura de armazenamento. A temperatura de armazenamento é denominada de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento. De forma caracterizar os processos de arrefecimento das F&V verifica-se uma crescente utilização de software de simulação e modelação computacional. Na presente dissertação, com o intuito de caracterizar o processo de arrefecimento do pêssgo na fase de pós-colheita, recorreu-se à ferramenta computacional COMSOL Multiphysics com o objetivo de modelar um empacotamento de pêssgos e estudar o seu processo de arrefecimento. Assim, foram primeiramente obtidos dados experimentais relativos à variação de temperatura ao longo do tempo de dois lotes distintos, arrefecidos a ar e a água, de forma a validar um modelo computacional produzido no COMSOL Multiphysics que descrevesse a variação da temperatura ao longo do tempo dos dois lotes de pêssgo para ambas situações de arrefecimento. Recorrendo-se ao COMSOL Multiphysics foram realizados estudos paramétricos de modo a avaliar a influencia no tempo de arrefecimento de F&V de parâmetros como dimensão física; temperatura inicial e temperatura de escoamento não perturbado. O estudo paramétrico foi realizado para situações de arrefecimento em ar e em água.

## Palavras-chave

Pré-arrefecimento, modelação computacional, pós-colheita, produtos perecíveis, pêssgo.



---

## Abstract

The constant and high population growth endangers the sustainability of the planet. It is estimated that by 2050 the world population will reach 9.1 billion, thus there is a need for an increase of around 70% of the food production in order to sustain the population growth. The reduction of losses in the postharvest phase is important so that there are readily available food products without the excessive exploitation of additional natural resources to support the increase in population. Because temperature is one of the most influential factors that influence the shelf life of fruits and vegetables it is imperative to cool them as fast as possible after their harvest. The rapid cooling of fruit and vegetable products in the post-harvest stage is denominated pre-cooling. Pre-cooling consists in the rapid removal of the field heat from the products in order to slow-down their physiological processes and thus extend its life, in order to preserve them in quantity and quality. The cooling of perishable products has been subject of study in order to determine how long it takes for the products to be cooled to their storage temperature. The storage temperature is commonly referred to as seven-eighths of cooling time, this corresponds to the cooling of the products to 0,125 temperature in the dimensionless form. In order to characterize the cooling processes of F&V there has been a growth in the use of computer modeling and simulation software. With the aim of characterizing the peach cooling process in the post-harvest stage, COMSOL Multiphysics® was used in order to model a packed layer of peaches. Thus, it was first modeled and validated a model that represented the variation of temperature over time of two batches of peaches subjected to air cooling and hydrocooling. Subsequently, using COMSOL Multiphysics'® capabilities to perform parametric studies, relevant parameters that influence the cooling time of F&V products such as dimensions, initial produce temperature and fluid temperature were changed with the intention to study its effect on the cooling time. The parametric study was conducted considering both air-cooling and hydrocooling.

## Keywords

Pre-cooling, computer modeling, post-harvest, perishables, peach.



---

## Índice

Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	v
Abstract .....	vii
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas .....	xvii
Nomenclatura.....	xxi
<b>1. Introdução .....</b>	<b>23</b>
1.1. Perspetiva geral.....	23
1.2. O problema em estudo e a sua relevância .....	26
1.3. Revisão bibliográfica .....	27
1.4. Objetivos e contribuição da dissertação .....	31
1.5. Visão geral e organização da dissertação .....	32
<b>2. O arrefecimento na pós-colheita .....</b>	<b>35</b>
2.1. Pré-arrefecimento .....	35
2.2. Necessidade do arrefecimento .....	36
2.3. Processos fisiológicos das F&V .....	37
2.3.1. Transpiração .....	37
2.3.2. Respiração.....	38
2.3.3. Efeito do etileno .....	38
2.4. Escolha de métodos de pré-arrefecimento .....	39
2.4.1. Natureza do produto a arrefecer .....	39
2.4.2. Requerimentos quanto ao empacotamento .....	39
2.4.3. Escoamento de produtos.....	40
2.5. Arrefecimento a ar .....	40
2.5.1. Arrefecimento em câmaras frias .....	40
2.5.2. Arrefecimento a ar forçado .....	41
2.6. Arrefecimento a água.....	42
2.6.1. Tipos de Hydrocooler .....	44
2.6.2. Eficiência dos hydrocoolers .....	46
2.6.3. Tratamento de água dos hydrocoolers .....	47
2.7. Hydrair Cooling.....	47
2.8. Arrefecimento a vácuo .....	48
2.9. Condução de calor em regime transitório .....	49
2.9.1. Equação da condução de calor .....	49
2.9.2. Condução de calor unidimensional numa esfera .....	50

2.9.3.	Método capacitivo .....	51
2.9.4.	Fração de diferencial de temperatura não realizada.....	54
2.9.5.	Tempo de Meio Arrefecimento .....	56
2.9.6.	Coeficiente de Arrefecimento .....	57
2.10.	Nota conclusiva.....	58
<b>3.</b>	<b>Modelação computacional do processo de arrefecimento.....</b>	<b>61</b>
3.1.	Introdução .....	61
3.2.	COMSOL Multiphysics ® versão 5.2b.....	61
3.3.	Implementação do modelo.....	61
3.3.1.	COMSOL Multiphysics ® - Model Wizard .....	62
3.3.2.	Geometria e propriedades termofísicas.....	64
3.3.3.	COMSOL Multiphysics ® - Model Builder.....	65
3.3.4.	Parametrização.....	66
3.4.	Validação do modelo.....	80
3.4.1.	Experimental.....	80
3.4.2.	Validação do modelo numérico - Arrefecimento a ar.....	83
3.4.3.	Validação do modelo numérico - Arrefecimento a água .....	85
3.4.4.	Comparação com Solução Analítica.....	87
3.5.	Nota conclusiva .....	90
<b>4.</b>	<b>Análise e discussão de resultados .....</b>	<b>93</b>
4.1.	Introdução .....	93
4.2.	Estudo paramétrico .....	93
4.2.1.	Efeito da variação do diâmetro.....	94
4.2.2.	Efeito da variação da temperatura de entrada .....	120
4.2.3.	Efeito da variação da temperatura do fluido de arrefecimento .....	134
4.3.	Nota conclusiva .....	147
<b>5.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>149</b>
5.1.	Recapitulação .....	149
5.2.	Sugestão para trabalho futuro .....	150
	<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>151</b>
<b>6.</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>151</b>
<b>Anexos.....</b>		<b>155</b>
A.1.	Refrigeração a ar .....	155
A.1.1.	Calibre C - Núcleo.....	155
A.1.2.	Calibre C - Superfície.....	157
A.1.3.	Calibre C - Comparação entre Núcleo e Superfície .....	158
A.1.4.	Calibre B - Núcleo.....	160

---

A.1.5.	Calibre B - Superfície.....	161
A.1.6.	Calibre B - Comparação entre núcleo e superfície.....	163
A.1.7.	Calibre A - Núcleo.....	164
A.1.8.	Calibre A - Superfície.....	166
A.1.9.	Calibre A - Comparação entre núcleo e superfície.....	167
A.1.10.	Calibre AA - Núcleo.....	169
A.1.11.	Calibre AA - Superfície.....	170
A.1.12.	Calibre AA - Comparação entre núcleo e superfície.....	172
A.1.13.	Calibre AAA - Núcleo.....	173
A.1.14.	Calibre AAA - Superfície.....	175
A.1.15.	Calibre AAAA - Núcleo.....	178
A.1.16.	Calibre AAAA - Superfície.....	179
A.1.17.	Calibre AAAA - Comparação entre o núcleo e superfície.....	181
A.2	Refrigeração a água.....	183
A.2.1.	Calibre C - Núcleo.....	183
A.2.2.	Calibre C - Superfície.....	185
A.2.3.	Calibre C - Comparação entre núcleo e superfície.....	186
A.2.4.	Calibre B - Núcleo.....	188
A.2.5.	Calibre B - Superfície.....	190
A.2.6.	Calibre B - Comparação entre núcleo e superfície.....	191
A.2.7.	Calibre A - Núcleo.....	193
A.2.8.	Calibre A - Comparação entre núcleo e superfície.....	196
A.2.9.	Calibre AA - Núcleo.....	197
A.2.10.	Calibre AA - Superfície.....	199
A.2.11.	Calibre AA - Comparação entre núcleo e superfície.....	200
A.2.12.	Calibre AAA - Núcleo.....	202
A.2.13.	Calibre AAA - Comparação entre núcleo e superfície.....	205
A.2.14.	Calibre AAAA - Núcleo.....	206
A.2.15.	Calibre AAAA - Superfície.....	208
A.2.16.	Calibre AAAA - Comparação entre núcleo e superfície.....	209
Anexo B	- Expressões obtidas para o cálculo das propriedades termofísicas do pêssigo213	



## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Estimativa da evolução da população mundial até 2050 (United Nations, 2008).....	24
Figura 2.1 - Unidade de arrefecimento mecânico.....	43
Figura 2.2 - Hydrocooler do tipo chuva.....	45
Figura 2.3 - Hydrocooler do tipo imersão.....	46
Figura 2.4 - Esfera submetida à convecção em toda a sua superfície.....	50
Figura 2.5 - Evolução da temperatura ao longo do tempo com a variação de $\tau$ .....	53
Figura 2.6 - Fracção de diferença de temperatura não realizada (ASHRAE, 2010).....	56
Figura 3.1 - Menu de selecção de dimensão espacial.....	62
Figura 3.2 - Menu do módulo de Transmissão de Calor.....	63
Figura 3.3 - Menu de selecção do tipo de estudo.....	63
Figura 3.4 - Model Builder e Transmissão de Calor em Sólidos.....	65
Figura 3.5 - Parametrização da geometria esférica.....	66
Figura 3.6 - Propriedades físicas do modelo numérico.....	67
Figura 3.7 - Propriedades do material referidas no sub-menu <i>Heat Transfer in Solids</i> .....	67
Figura 3.8 - Definição do fluxo de calor imposto na fronteira.....	69
Figura 3.9 - Variação do coeficiente convectivo em função da velocidade de escoamento.....	71
Figura 3.10 - Definições do tipo de malha e configuração do tamanho dos elementos.....	73
Figura 3.11- Comparação entre três tipos de malhas computacionais, <i>Extremely Coarse</i> , <i>Normal</i> e <i>Extremely Fine</i> .....	74
Figura 3.12 - Parametrização do menu <i>Study Settings</i> .....	75
Figura 3.13 - Componente <i>Results</i> e sub-menus <i>Data Sets</i> e <i>Derived Values</i> .....	76
Figura 3.14 - Registo das coordenadas do ponto de medição.....	76
Figura 3.15 - Implementação do ponto de medição no COMSOL.....	77
Figura 3.16 - Configurações relativas ao <i>Point Evaluation</i> do núcleo.....	77
Figura 3.17 - Configuração do <i>Point Evaluation</i> e ponto de medição da superfície.....	78
Figura 3.18 - Inserção de parâmetros no menu <i>Parameters</i> .....	79
Figura 3.19 - Parametrização utilizando variáveis.....	79
Figura 3.20 - Parametrização do menu <i>Parametric Sweep</i> .....	80
Figura 3.21 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, arrefecimento a ar.....	82
Figura 3.22 - Variação da temperatura adimensional, arrefecimento a água.....	83
Figura 3.23 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o lote 1, lote 2 e modelo computacional, núcleo, arrefecimento a ar.....	84
Figura 3.24 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o lote 1, lote 2 e modelo computacional, núcleo, arrefecimento a água.....	86
Figura 3.25 - Variação da temperatura na sua forma adimensional, Solução Analítica, arrefecimento a ar.....	88
Figura 3.26 - Variação da temperatura na sua forma adimensional, Solução Analítica, Arrefecimento a Água.....	90
Figura 4.1 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre D, Núcleo.....	95
Figura 4.2 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre D, Núcleo.....	97
Figura 4.3 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre D, Superfície.....	98
Figura 4.4 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre D, Superfície.....	99
Figura 4.5 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 51mm, Núcleo e Superfície.....	100
Figura 4.6 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para vários diâmetros, Núcleo ..	103
Figura 4.7 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para vários diâmetros, Superfície.....	104
Figura 4.8 - Tempo de Meio Arrefecimento para o Núcleo e Superfície dos vários diâmetros.....	105
Figura 4.9 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para o Núcleo e Superfície dos vários diâmetros ..	107
Figura 4.10 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre D, Núcleo.....	108
Figura 4.11 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre D, Núcleo.....	110
Figura 4.12 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre D, Superfície.....	111

Figura 4.13 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre D, Superfície .....	112
Figura 4.14 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 51 mm, Núcleo e Superfície .....	113
Figura 4.15 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para vários diâmetros, Núcleo ..	115
Figura 4.16 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo vários diâmetros, Superfície ...	116
Figura 4.17 - Tempo de Meio Arrefecimento para o Núcleo dos vários diâmetros .....	117
Figura 4.18 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para o Núcleo e Superfície dos vários diâmetros	119
Figura 4.19 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Núcleo.....	121
Figura 4.20 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Superfície.....	122
Figura 4.21 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Núcleo .....	123
Figura 4.22 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Superfície .....	125
Figura 4.23 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Núcleo.....	128
Figura 4.24 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Superfície.....	129
Figura 4.25 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Núcleo .....	131
Figura 4.26 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Superfície .....	132
Figura 4.27 - Variação da temperatura adimensional ao longo tempo, Núcleo .....	135
Figura 4.28 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Superfície.....	136
Figura 4.29 - Variação da temperatura ao longo tempo, Núcleo .....	137
Figura 4.30 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Superfície .....	139
Figura 4.31 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Núcleo.....	141
Figura 4.32 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Superfície.....	143
Figura 4.33 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Núcleo .....	145
Figura 4.34 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Superfície .....	146
Figura A.1 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre C, Núcleo .....	155
Figura A.2 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre C, Núcleo .....	156
Figura A.3 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre C, Superfície .....	157
Figura A.4 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre C, Superfície.....	158
Figura A.5 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 56 mm, Núcleo e Superfície .....	158
Figura A.6 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre B, Núcleo. ....	160
Figura A.7 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre B, Núcleo .....	161
Figura A.8 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre B, Superfície .....	161
Figura A.9 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre B, Superfície.....	162
Figura A.10 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 61mm, Núcleo e Superfície.....	163
Figura A.11 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre A, Núcleo.....	164
Figura A.12 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre A, Núcleo .....	165
Figura A.13 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre A, Superfície .....	166
Figura A.14 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre A, Superfície.....	167
Figura A.15 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 67 mm, Núcleo e Superfície.....	167
Figura A.16 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AA, Núcleo .....	169
Figura A.17 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AA, Núcleo .....	170
Figura A.18 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AA, Superfície .....	170
Figura A.19 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AA, Superfície .....	171
Figura A.20 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 73 mm, Núcleo e Superfície.....	172
Figura A.21 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAA, Núcleo.....	173
Figura A.22 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAA, Núcleo.....	174
Figura A.23 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAA, Superfície.....	175
Figura A.24 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAA, Superfície .....	176

Figura A.25 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 80 mm, Núcleo e Superfície.....	176
Figura A.26 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAAA, Núcleo.....	178
Figura A.27 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAAA, Núcleo.....	179
Figura A.28 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAAA, Superfície.....	179
Figura A.29 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAAA, Superfície.....	180
Figura A.30 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 90 mm, Núcleo e Superfície.....	181
Figura A.31 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre C, Núcleo.....	183
Figura A.32 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre C, Núcleo.....	184
Figura A.33 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre C, Superfície.....	185
Figura A.34 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre C, Superfície.....	186
Figura A.35 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 56 mm, Núcleo e Superfície.....	186
Figura A.36 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre B, Núcleo.....	188
Figura A.37 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre B, Núcleo.....	189
Figura A.38 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre B, Superfície.....	190
Figura A.39 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre B, Superfície.....	191
Figura A.40 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 61mm, Núcleo e Superfície.....	191
Figura A.41 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre A, Núcleo.....	193
Figura A.42 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre A, Núcleo.....	194
Figura A.43 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre A, Superfície.....	194
Figura A.44 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre A, Superfície.....	195
Figura A.45 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 67 mm, Núcleo e Superfície.....	196
Figura A.46 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AA, Núcleo.....	197
Figura A.47 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AA, Núcleo.....	198
Figura A.48 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AA, Superfície.....	199
Figura A.49 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AA, Superfície.....	200
Figura A.50 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 73mm, Núcleo e Superfície.....	200
Figura A.51 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAA, Núcleo.....	202
Figura A.52 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAA, Núcleo.....	203
Figura A.53 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAA, Superfície.....	203
Figura A.54 - Half-Cooling e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAA, Superfície.....	204
Figura A.55 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 80 mm, Núcleo e Superfície.....	205
Figura A.56 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAAA, Núcleo.....	206
Figura A.57 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAAA, Núcleo.....	207
Figura A.58 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAAA, Superfície.....	208
Figura A.59 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAAA, Superfície.....	209
Figura A.60 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 90 mm, Núcleo e Superfície.....	209



## Lista de Tabelas

Tabela 3.1- Propriedades obtidas para o material do modelo.....	64
Tabela 3.2- Comparação das propriedades geométricas entre lotes .....	65
Tabela 3.3 - Parâmetros relativos ao ensaio de arrefecimento a ar .....	81
Tabela 3.4 - Parâmetros relativos ao ensaio de arrefecimento a água.....	82
Tabela 3.5 - Parâmetros relativos à simulação de arrefecimento a ar .....	84
Tabela 3.6 - Parâmetros relativos à simulação de arrefecimento a água.....	85
Tabela 3.7 - Propriedades consideradas para a resolução analítica, arrefecimento a ar.....	87
Tabela 3.8 - Propriedades consideradas para a resolução analítica, arrefecimento a água.....	89
Tabela 4.1 - Calibres de pêssego em função do diâmetro .....	94
Tabela 4.2 - Condições de ensaio para o arrefecimento a ar .....	94
Tabela 4.3 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Calibre D, Núcleo .....	96
Tabela 4.4 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre D.....	98
Tabela 4.5 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície para os diferentes diâmetros do Calibre D .....	101
Tabela 4.6 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície para os diferentes diâmetros do Calibre D .....	102
Tabela 4.7 - Tempo de Meio Arrefecimento para ambos núcleo e superfície, diferença em percentagem e em minutos para os vários diâmetros considerados, arrefecimento a ar .....	104
Tabela 4.8 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para ambos núcleo e superfície, diferença em percentagem e em minutos para os vários diâmetros considerados, arrefecimento a ar .....	106
Tabela 4.9 - Condições de ensaio para o arrefecimento a água.....	108
Tabela 4.10 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Calibre D, Núcleo.....	109
Tabela 4.11 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre D.....	111
Tabela 4.12 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície para os diferentes diâmetros do Calibre D .....	113
Tabela 4.13 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície para os diferentes diâmetros do Calibre D .....	114
Tabela 4.14 - Tempo de Meio Arrefecimento para ambos núcleo e superfície, diferença em percentagem e em minutos, para os vários diâmetros considerados, arrefecimento a água .....	116
Tabela 4.15 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para ambos núcleo e superfície, diferença em percentagem e em minutos para os vários diâmetros considerados, arrefecimento a água .....	118
Tabela 4.16 - Condições de ensaio para o arrefecimento a ar .....	120
Tabela 4.17 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo.....	121
Tabela 4.18 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície.....	123
Tabela 4.19 - Temperatura em intervalos de 1 hora para os vários valores de $T_i$ , Núcleo .....	124
Tabela 4.20 - Temperatura em intervalos de 1 hora para os vários valores de temperatura inicial, Superfície .....	126
Tabela 4.21 - Diferença de temperatura entre núcleo e superfície, para as várias $T_i$ e instantes de tempo .....	127
Tabela 4.22 - Condições de ensaio para o arrefecimento a água .....	127
Tabela 4.23 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo.....	128
Tabela 4.24 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície.....	130
Tabela 4.25 - Temperatura em intervalos de 10 minutos para os vários valores de temperatura inicial, Núcleo.....	131

Tabela 4.26 - Temperatura em intervalos de 10 minutos para os vários valores de temperatura de temperatura inicial, Superfície .....	133
Tabela 4.27 - Diferença de temperatura entre núcleo e superfície, para as várias $T_i$ e instantes de tempo .....	133
Tabela 4.28 - Condições de ensaio para o arrefecimento a ar.....	134
Tabela 4.29 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo.....	135
Tabela 4.30 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície.....	137
Tabela 4.31 - Temperatura em intervalos de 1 hora para os vários valores de temperatura de escoamento não perturbado, Núcleo.....	138
Tabela 4.32 - Temperatura em intervalos de 10 minutos para os vários valores de temperatura de escoamento não perturbado, Superfície.....	139
Tabela 4.33 - Diferença de temperatura entre núcleo e superfície, para as várias $T_\infty$ e instantes de tempo .....	140
Tabela 4.34 - Condições de ensaio para o arrefecimento a água .....	141
Tabela 4.35 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo.....	142
Tabela 4.36 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície.....	144
Tabela 4.37 - Temperatura em intervalos de 10 minutos para os vários valores de temperatura de escoamento não perturbado, Núcleo .....	145
Tabela 4.38 - Diferença de temperatura entre núcleo e superfície, em intervalos de 10 minutos para os vários valores de temperatura de escoamento não perturbado.....	147
Tabela A.1 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre C.....	156
Tabela A.2 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre C.....	157
Tabela A.3 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre C .....	159
Tabela A.4 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre C ....	159
Tabela A.5 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre B.....	160
Tabela A.6 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre B.....	162
Tabela A.7 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre B .....	163
Tabela A.8 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre B ....	164
Tabela A.9 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre A.....	165
Tabela A.10 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre A .....	166
Tabela A.11 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre A .....	168
Tabela A.12 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre A ...	168
Tabela A.13 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre AA .....	169
Tabela A.14 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre AA .....	171
Tabela A.15 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AA .....	172
Tabela A.16 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AA .	173
Tabela A.17 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre AAA.....	174
Tabela A.18 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL.....	175
Tabela A.19 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAA .....	177
Tabela A.20 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAA	177
Tabela A.21 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre AAAA .....	178
Tabela A.22 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre AAAA .....	180
Tabela A.23 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAAA .....	181
Tabela A.24 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAAA .....	182

Tabela A.25 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre C.....	183
Tabela A.26 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre C.....	185
Tabela A.27 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre C.....	187
Tabela A.28 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre C...	187
Tabela A.29 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre B.....	188
Tabela A.30 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre B.....	190
Tabela A.31 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre B.....	192
Tabela A.32 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre B...	192
Tabela A.33 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre A.....	193
Tabela A.34 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre A.....	195
Tabela A.35 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre A.....	196
Tabela A.36 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre A...	197
Tabela A.37 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre AA.....	198
Tabela A.38 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre AA.....	199
Tabela A.39 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AA.....	201
Tabela A.40- Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AA..	201
Tabela A.41 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre AAA.....	202
Tabela A.42 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre AAA.....	204
Tabela A.43 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAA.....	205
Tabela A.44 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAA	206
Tabela A.45 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre AAAA.....	207
Tabela A.46 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre AAAA.....	208
Tabela A.47 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAAA.....	210
Tabela A.48 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAAA.....	210
Tabela B.1 - Conteúdo de humidade, proteínas, gordura e carboidratos presentes no pêssego.....	207
Tabela B.2 - Condutividade térmica das várias componentes alimentares, válidas para $-40^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ ..	207
Tabela B.3 - Difusividade térmica das várias componentes alimentares, válidas para $-40^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ ...	208
Tabela B.4 - Densidade das várias componentes alimentares, válidas para $-40^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ .....	208
Tabela B.5 - Calor específico das várias componentes alimentares, válidas para $-40^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ .....	209



## Nomenclatura

### Geral:

T	Temperatura, Grau Celsius [°C], absoluta [K];
$T_i$	Temperatura inicial, Grau Celsius [°C], absoluta [K];
$T_s$	Temperatura superficial, Grau Celsius [°C], absoluta [K];
$T_\infty$	Temperatura de escoamento não perturbado, Grau Celsius [°C], absoluta [K];
k	Condutibilidade térmica, [W/(m K)];
$\alpha$	Difusividade térmica, [m <sup>2</sup> /s];
$\rho$	Massa volúmica, [kg/m <sup>3</sup> ];
$C_p$	Calor específico, [kJ/(kg K)];
h	Coefficiente convectivo, [W/(m <sup>2</sup> K)];
t	Tempo, [s];
Bi	Número de Biot;
Fo	Número de Fourier;
$\tau$	Constante de tempo térmica;
C	Coefficiente de arrefecimento, [s <sup>-1</sup> ];
J	Fator de atraso;
r	Raio, [mm] ou [m];
$L_c$	Comprimento característico, [m];
A	Área [m <sup>2</sup> ];
V	Volume [m <sup>3</sup> ];
$\theta$	Temperatura na forma adimensional;
$\dot{E}_{st}$	Taxa a que a energia é acumulada;
$\dot{E}_{in}$	Taxa de entrada de energia;
$\dot{E}_{out}$	Taxa de saída de energia;
$\dot{E}_g$	Taxa a que a energia é gerada;
Q	Carga térmica, [W];
$q_{cond}$	Fluxo de calor por condução, [W/m <sup>2</sup> ];
$q_{conv}$	Fluxo de calor por convecção, [W/m <sup>2</sup> ];
$t_{1/2}$	Tempo de Meio Arrefecimento [min];
$t_{7/8}$	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento [min];
u	Vetor de velocidade, [m/s];

w                    Velocidade de escoamento, [m/s];

***Acrónimos:***

*FAO*                Food and Agriculture Organization of the United Nations

*F&V*                Frutas e vegetais;

*UBI*                Universidade da Beira Interior

# 1. Introdução

O arrefecimento rápido das frutas e vegetais (F&V) na fase da pós-colheita é um passo essencial para uma preservação com sucesso e consequente extensão do tempo de vida dos produtos fruto-hortícolas. Assim, torna-se relevante o estudo da variação da temperatura ao longo do tempo destes. Ao longo do presente capítulo introdutório é primeiramente realizado um enquadramento relativo ao desperdício alimentar na fase da pós-colheita e dos benefícios do pré-arrefecimento para a prevenção desse desperdício. De seguida apresentam-se mais detalhadamente o problema em estudo e a revisão bibliográfica onde se exibem as consequências nefastas de uma pobre fase de pré-arrefecimento, e o trabalho de outros autores na temática do arrefecimento de frutas e vegetais. Por último, apresentam-se os objetivos que se pretendem alcançar com a realização da presente dissertação.

## ***1.1. Perspetiva geral***

Estima-se que no ano 2050 a população mundial atinja os 9,1 bilhões. Este crescimento populacional corresponde a um aumento de 34 por cento da população mundial atualmente existente. Desta forma, será necessário um incremento na ordem dos 70% da produção alimentar de forma a sustentar o aumento populacional. A maioria deste aumento populacional ocorrerá em país em desenvolvimento, tal como é possível observar no gráfico da Figura 1.1. Assim, com o constante aumento da população e crescimento da demanda por produtos alimentares, a redução das perdas na fase de pós colheita torna-se importante de forma a existirem produtos alimentares prontamente disponíveis sem a sobrecarga de sobre-exploração de recursos naturais adicionais para suportar o aumento do crescimento populacional (FAO, 2009).

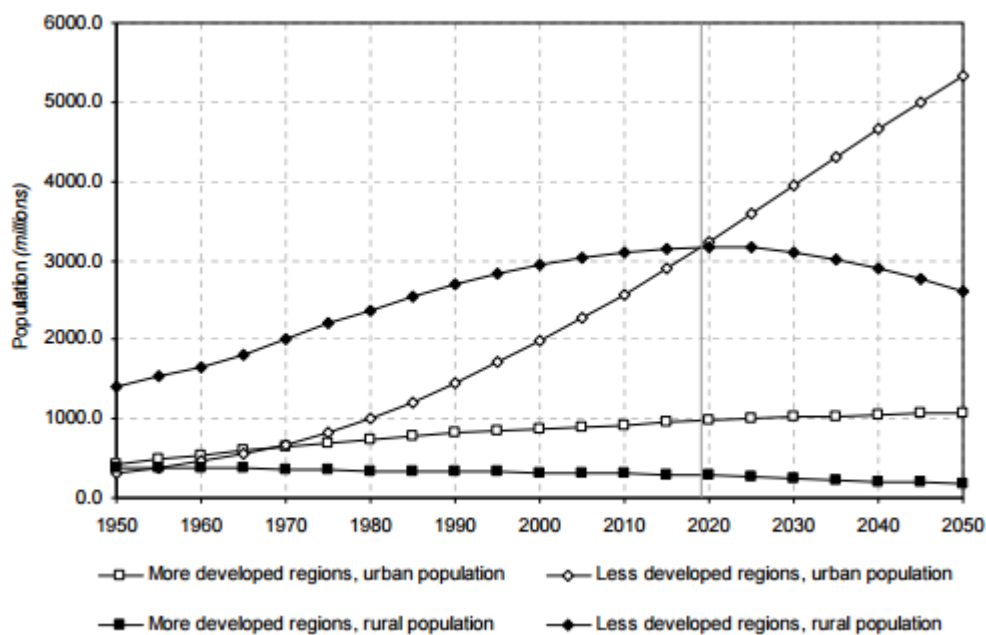


Figura 1.1 - Estimativa da evolução da população mundial até 2050 (United Nations, 2008)

As perdas alimentares representam desperdício de recursos tais como terra, água e energia, entre outros. A produção de alimentos que não irão ser consumidos leva à produção desnecessária de emissões de dióxido de carbono como também da desvalorização económica dos produtos alimentares produzidos (Gustavsson, Cederberg, & Sonesson, 2011).

O sector das frutas e vegetais é dos sectores que mais sofre relativamente a perdas e desperdício. Com cerca de 45% de perdas ao longo do processo da agricultura, pós colheita, processamento, distribuição e consumo, quase metade das frutas e vegetais produzidos são desperdiçados. Na Europa, América do Norte e Oceânia, as perdas relativas à fase da pós-colheita compreendem cerca de 6% das frutas e vegetais produzidos. No continente Asiático, Africano e América Latina, as perdas relativas à fase da pós-colheita são relativas a cerca de 10% das frutas e vegetais produzidos (FAO, 2012).

A deterioração da qualidade F&V começa a partir do momento em que são colhidos e dá-se até ao seu consumo. Estes apodrecem se não forem consumidos ou propriamente conservados. Assim as F&V são classificadas como facilmente perecíveis. Após a colheita, a qualidade global das F&V é difícil de melhorar, mas pode ser mantida. A aceitação das F&V nos mercados depende da sua qualidade, assim a preservação das F&V na fase da pós-colheita é um passo crucial. A qualidade das F&V frescos depende do pré-arrefecimento prévio à fase de armazenamento e marketing (Ahdmad, et al., 2016).

À rápida diminuição da temperatura de campo dos produtos frescos até à sua temperatura ideal de armazenamento dá-se o nome de pré-arrefecimento. O arrefecimento rápido é essencial pois permite estender o tipo de vida útil das F&V. A remoção do calor de campo dos F&V reduz a taxa a que decorrem os seus processos fisiológicos. Como as F&V são organismos vivos, estes continuam a respirar após a sua colheita. O processo de respiração faz com que estes se deteriorem, diminuindo também o seu valor nutricional, havendo também mudanças negativas no seu aspeto e diminuição do seu peso vendável. Estes processos fisiológicos não podem ser impedidos na sua totalidade, mas podem ser abrandados (Ahmdad, et al., 2016).

Uma maior temperatura está ligada a uma maior taxa a que ocorrem os processos biológicos de um produto alimentar fresco. Estes processos biológicos traduzem-se numa perda de cor, sabor, nutrientes e mudança de textura. Em média, a taxa a que estes processos se dão duplica a cada subida de 10°C. Ao se reduzir em 10°C a temperatura de um produto, é expectável que o seu tempo de vida duplique. O arrefecimento apresenta vários benefícios para produtos F&V facilmente perecíveis: redução da taxa de respiração (diminuindo a sua perecibilidade); redução da transpiração (diminuindo a quantidade de água perdida, reduzindo o enrugamento); redução da produção de etileno (atrasando o amadurecimento); diminuição da atividade de microrganismos (Kitinoja, 2013).

Desta forma a componente do ambiente da fase de pós-colheita que mais tem impacto e influência na qualidade das frutas e vegetais é a temperatura. Uma boa gestão da temperatura é o passo mais importante e também mais simples para atrasar a deterioração dos produtos. A melhor preservação possível alcançável para uma fruta ou vegetal só pode ser obtida se os produtos forem rapidamente arrefecidos após a sua colheita. Em regra geral, quanto mais baixa for essa temperatura (dentro dos limites aplicáveis a cada tipo específico de fruta ou vegetal), maior será o tempo de conservação possível (Nunes, 2008).

O pêsego é um fruto altamente perecível, podendo desenvolver danos devido ao frio se for mantido mais do que duas a três semanas armazenado a uma temperatura de 0 °C. A probabilidade de um pêsego desenvolver danos devido ao frio depende não só da temperatura de armazenamento, como do tempo de armazenamento, espécie de pêsego e maturidade da fruta aquando a sua colheita. De forma a prevenir danos por frio, os pêsegos devem ser armazenados a uma temperatura compreendida entre os -1 °C e 0 °C, com uma humidade relativa de 90% a 95%. Quando o pêsego é arrefecido rapidamente após a sua colheita em sistemas de água ou ar forçado com elevada humidade demonstra sofrer menos danos e perda de peso durante o posterior armazenamento a 4°C (Nunes, 2008).

De forma a arrefecer eficientemente as frutas e vegetais na fase de pós-colheita é necessário estimar a variação de temperatura ao longo do tempo dos produtos. Esta variação de temperatura é compreendida entre a temperatura inicial das frutas e vegetais e a temperatura de armazenamento. A temperatura inicial corresponde à temperatura ambiente na fase da colheita. O tempo que as frutas e vegetais demoram a arrefecer é dependente (de entre vários fatores) do tipo de método de arrefecimento escolhido, dimensões dos produtos a refrigerar, a sua temperatura inicial e temperatura do fluido de arrefecimento. Através da utilização de programas computacionais torna-se possível obter estimativas do tempo de pré-arrefecimento com alguma precisão (ASHRAE, 2010).

### **1.2. O problema em estudo e a sua relevância**

Após a colheita das F&V, de forma preservar a sua qualidade e estender o seu tempo de vida, é necessário prevenir que estes se deteriorem. Assim, é essencial arrefecer os produtos o mais rápido possível após a sua colheita. A este processo dá-se o nome de pré-arrefecimento. Através do processo de pré-arrefecimento é possível remover rapidamente a carga térmica dos produtos após a sua colheita (calor de campo). Assim, o estudo da caracterização do processo de arrefecimento do pêsego na fase da pós-colheita permite a obtenção de dados de variação de temperatura relevantes que possibilitam uma melhoria do processo do pré-arrefecimento, diminuindo assim perdas na fase da pós-colheita devido a processos de refrigeração indevidos.

De forma a arrefecer e assim preservar com sucesso o pêsego torna-se necessário saber os tempos de arrefecimento adequados. Um lote de pêsegos com permanência insuficiente no sistema de arrefecimento poderá encontrar-se à temperatura ideal para conservação na superfície, mas o seu núcleo não se encontra arrefecido o suficiente, apodrecendo posteriormente noutras fases da cadeia de distribuição de F&V. Assim, a remoção precoce do sistema de arrefecimento é prejudicial à sua preservação.

Um pêsego que permaneça demasiado tempo no sistema de arrefecimento pode ter a sua superfície danificada, devido a congelamento desta, ou então esmorecer devido à diminuição do conteúdo de humidade. Também uma permanência excessivamente demorada leva a desperdício energético, devido ao funcionamento prolongado dos sistemas de arrefecimento. Estes são exemplos de ocorrências que diminuem a qualidade dos produtos F&V, levando ao desperdício e diminuição da quantidade de produtos frescos prontos a serem vendidos.

O tempo de permanência de um produto F&V num sistema de arrefecimento é determinado principalmente pelas suas dimensões, temperatura de entrada e temperatura do fluido de arrefecimento. Através da caracterização do processo de arrefecimento do pêsego na fase de

pós-colheita, com a utilização de software de modelação computacional com o intuito de realizar simulações de casos de estudo, torna-se possível estimar o tempo que o pêssego necessita de permanecer nos sistemas de arrefecimento. Assim, através da utilização de software de modelação computacional torna-se possível prever de uma forma mais fidedigna a variação da temperatura ao longo do tempo, comparativamente a métodos tradicionais como o método do “Fração de Temperatura não Realizada”.

### **1.3. Revisão bibliográfica**

O tema do pré-arrefecimento (arrefecimento rápido de F&V na fase de pós-colheita) tem sido desenvolvido através da contribuição de vários autores ao longo do tempo. Neste subcapítulo é apresentada uma revisão bibliográfica referindo-se diversos trabalhos relevantes ao tema em questão.

No trabalho de Bennett (1963) foi estudado o comportamento térmico dos pêssegos quando sujeitos a refrigeração a água. Foi determinada a difusividade térmica média para seis variedades de pêssego distintas. Determinaram-se também coeficientes de filme de transmissão de calor da superfície dos pêssegos para o fluido de arrefecimento. Produziram-se equações de previsão de distribuição de temperatura nos pêssegos para diversos tamanhos de pêssego e de condições de arrefecimento. A partir da consideração da difusividade térmica foi possível prever a taxa de arrefecimento dos pêssegos, com base nas suas dimensões e temperaturas iniciais. Desta forma torna-se exequível a previsão do tempo necessário de permanência no sistema de arrefecimento com o objetivo de arrefecer os pêssegos para valores de temperatura específicos.

Bennett (1965) produziu um guia prático de arrefecimento de pêssegos usando água. Foi feita uma análise dos vários tipos de arrefecimento a água comercialmente disponíveis, expondo-se as suas diferenças, e os métodos usados para arrefecer a água. São discutidos os diferentes requisitos de arrefecimento dos pêssegos, tais como a sua temperatura de entrada no sistema de arrefecimento, a temperatura final desejada, e a quantidade de pêssegos a arrefecer. Foi realizado assim um estudo sobre o tempo de permanência necessário no sistema de arrefecimento. Considerou-se o efeito da variação do diâmetro dos pêssegos quando arrefecidos para a mesma temperatura de água de arrefecimento. Estudou-se a resposta térmica do mesmo diâmetro de pêssego quando arrefecido por água a temperaturas distintas. Estudou-se a carga térmica removida dos pêssegos ao longo do tempo para vários diâmetros distintos. Finalmente, são discutidas técnicas de melhoramento dos sistemas de arrefecimento a água e qual o ponto ótimo de registo da variação do tempo dentro do pêssego.

Dincer (1992) estudou o arrefecimento de produtos alimentares com formato esférico e cilíndrico, tais como peras, tomates, abóboras e pepinos sujeitos a arrefecimento a água a várias temperaturas de arrefecimento, de forma a criar modelos simples de determinação do coeficiente convectivo. Neste modelo foram incorporados os coeficientes de atraso e arrefecimento ( $C$  e  $j$  provenientes da equação relativa à regressão na forma exponencial da variação da temperatura ao longo do tempo das frutas e vegetais sujeitos ao arrefecimento a água) e as propriedades termofísicas dos produtos. As frutas e vegetais foram arrefecidas por lotes (de 5, 10, 15 e 20kg) para as temperaturas de fluido de arrefecimento de 0,5, 1 e 1,5°C. Verificou-se que quanto maior o lote de produtos menor o coeficiente convectivo obtido.

Dincer (1992) comparou a distribuição da temperatura teórica e taxa de transmissão de calor em tomates com resultados experimentais quando arrefecidos a água (banho gelado de imersão com temperatura compreendida entre os 0,9 e 1,1°C). Para efeitos de comparação da distribuição da temperatura e da taxa de transmissão de calor foi registada a variação da temperatura no centro dos tomates como também no ponto *Mass Average* e convertida para a sua forma adimensional. Para a realização da análise matemática da transmissão de calor em regime transitório, foram consideradas as seguintes hipóteses: esfera sólida homogénea; propriedades térmicas constantes; temperatura inicial uniforme; temperatura do meio de arrefecimento constante; coeficiente convectivo constante, geração de calor desprezável; condução de calor unidimensional. Os resultados obtidos através da análise teórica para a obtenção da variação da temperatura na sua forma adimensional ao longo do tempo provaram estar dentro dos 15% dos resultados obtidos experimentalmente para o arrefecimento de tomates.

Dincer (1994) estudou o arrefecimento de figos sujeitos a arrefecimento a ar em regime transitório. Foi produzido um modelo analítico que representa os figos como produtos esféricos. Nesse modelo são comparados os seguintes efeitos: convecção; convecção em conjunto com radiação; convecção em conjunto com radiação e também efeito da transferência de humidade no coeficiente convectivo. De forma a se comparar os vários efeitos, foi registada a variação da temperatura ao longo do tempo e convertida para a sua forma adimensional. Verificou-se que o último caso considerado provou ser o que mais se aproximava dos dados obtidos experimentalmente. Verificou-se também que com maior velocidade de escoamento, maior era a taxa de transmissão de calor para o meio de arrefecimento, diminuindo-se assim o tempo de arrefecimento dos produtos.

Alvarez et al. (1995) produziram um modelo numérico de transmissão de calor e massa de forma a descrever o processo de arrefecimento entre o ar e produtos agrícolas empacotados e empilhados em paletes. O modelo inclui o coeficiente convectivo médio global e foi validado

com resultados experimentais. Foi realizado um estudo paramétrico de forma a estudar a influência que a temperatura do ar de arrefecimento tem na variação do tempo de arrefecimento. Tratando-se de um modelo que considera empacotamentos empilhados estudaram-se dois pontos em específico, o ponto mais frio e o ponto mais quente, de forma avaliar a heterogeneidade do processo de arrefecimento dentro dos empilhamentos sujeitos às mesmas condições de arrefecimento e escoamento. Através deste estudo é possível avaliar a melhor posição para a colocação dos termopares.

Dincer (1996) produziu um modelo analítico com o objetivo de determinar o coeficiente convectivo de várias produtos esféricos (ameixas, pêssegos, tomates e peras) quando sujeitos a arrefecimento a água. De forma a validar o modelo analítico produzido, foi registada a variação da temperatura no núcleo ao longo do tempo dos vários produtos. Foram estudados dois casos para cada tipo de produto esférico: lote de 5kg e lote de 20kg. Para a produção do modelo analítico foram consideradas as seguintes hipóteses: propriedades térmicas da água e dos produtos invariantes ao longo do tempo; coeficiente convectivo constante; corpo esférico homogêneo e isotrópico; temperatura inicial uniforme do produto; nenhuma perda de água dos produtos ou geração de calor; regime transitório. Foram considerados os parâmetros de coeficiente de atraso e arrefecimento,  $j$  e  $C$ . Estes foram obtidos a partir da equação de regressão na forma exponencial da variação da temperatura ao longo do tempo. Assim, a partir destes valores foi obtido o valor de coeficiente convectivo. Verificou-se que para lotes maiores de produtos a serem arrefecidos, menor o coeficiente convectivo, como também verificado em Dincer (1992).

Dussán-Sarria et al. (2006) estudaram o processo de arrefecimento de figos da espécie *Ficus carica L.*, arrefecidos numa câmara fria com temperatura entre 1 a 3°C, de forma a determinar quanto tempo demoraria a arrefecer os figos à temperatura da câmara fria. A variação da temperatura dos figos foi registada no seu interior. Foram sujeitos a um caudal de 2,8 L/s por kg de produto arrefecido, uma velocidade de escoamento média de 2m/s. Os figos encontravam-se em caixas de cartão e foram sujeitos a pré-arrefecimento forçado, para passarem posteriormente à fase de exportação. Com este estudo produziram curvas de arrefecimento e através da regressão na forma exponencial do registo da variação da temperatura ao longo do tempo. Com base em dados experimentais, obtiveram a correlação analítica de previsão do decaimento da temperatura ao longo do tempo.

No trabalho de Kumar et al. (2007) estudou-se o efeito da velocidade do ar em arrefecimento a ar forçado no tempo de arrefecimento na fase de pré-arrefecimento de laranjas e tomates. Utilizou-se uma temperatura de arrefecimento compreendida entre os 4 e os 5 °C, com uma velocidade variada dos 1,2 aos 4,4 m/s. Verificou-se que embora a velocidade do ar tivesse

uma forte influência na variação da temperatura na sua forma adimensional para valores abaixo dos 0,6, para valores superiores a 3,5 m/s para o caso de arrefecimento de laranjas, e valores de 2,6 m/s para o caso de arrefecimento de tomates, o aumento da velocidade do ar não surtiu benefícios significativos no processo de arrefecimento. A utilização de velocidades superiores de escoamento não produziu diferenças significativas na taxa de arrefecimento nos instantes iniciais. Com este trabalho produziram correlações para a obtenção de valores de coeficiente convectivo para diferentes velocidades de ar. Os resultados obtidos pelas correlações preveem os resultados experimentais com um erro de 7,5%.

Utilizando o software de simulação numérica baseado no método dos elementos finitos COMSOL Multiphysics®, Ghiaus *et al.* (2010) estudaram os mecanismos através do qual diferentes parâmetros influenciam a uniformidade e a taxa do arrefecimento de morangos. Através da utilização do COMSOL Multiphysics® produziram um modelo computacional, com duas dimensões, com o objectivo de prever a evolução do campo térmico do morango para distintas condições de operação dos sistemas de arrefecimento. Os autores apresentam a evolução da temperatura ao longo do tempo em pontos característicos no modelo computacional, propondo soluções de arrefecimento com vista a optimizar o processo de arrefecimento. Consideraram-se seis casos de arrefecimento: convecção natural; convecção forçada; convecção natural e radiação; condução e convecção natural; condução, convecção natural e radiação; condução, condução forçada e radiação.

No trabalho de revisão de Ambaw *et al.* (2012) são discutidas várias aplicações derivadas da utilização de CFD em processos de arrefecimento característicos da fase de pós-colheita. A utilização de CFD permite estudar escoamentos, e processos de transmissão de calor e massa com detalhe, podendo-se desenvolver modelos computacionais para a previsão de fenómenos bio-físicos característicos dos produtos hortofrutícolas durante a fase da pós-colheita. Através do uso de CFD é possível incluir aspetos complexos tais como o empilhamento de empacotamentos, difusão de gases, cinemática, e dispersão de partículas. Devido à crescente complexidade geométrica de produtos na fase da pós-colheita, os sistemas e empacotamentos utilizados são fatores limitantes na utilização de modelos semi-empíricos utilizados em sistemas que envolvam turbulência ou meios porosos. São definidos três pontos essenciais na utilização de softwares comerciais de CFD: a fase de pré-processamento; resolução das equações do modelo físico; pós-processamento dos resultados. Na fase de pré-processamento são especificados os aspetos principais do problema a simular, tais como a geometria a definir, a malha computacional a aplicar, configuração das propriedades físicas do modelo e parâmetros do motor do software. A fase de resolução consiste na resolução iterativa das equações de governo discretizadas. Finalmente na fase de pós-processamento são expostos e

tratados os resultados obtidos pelas simulações. Refere-se também a importância das fases de verificação e validação. A fase de verificação consiste na comparação dos dados obtidos com modelos analíticos ou soluções numéricas de elevada precisão. A fase de validação consiste em verificar o quão próximos os resultados obtidos pela simulação são dos resultados obtidos experimentalmente.

Defraeye *et al.* (2013) através da utilização da ferramenta de CFD *Ansys Fluent* 13 modelaram numericamente três empacotamentos de laranjas de forma a estudar o desempenho de arrefecimento de cada empacotamento quando sujeito a arrefecimento forçado a ar. Para a validação experimental foi registada a variação da temperatura das laranjas em várias posições dentro do empacotamento, com o intuito de verificar as heterogeneidades no arrefecimento das laranjas e os coeficientes convectivos obtidos para cada tipo de empacotamento.

Han *et al.* (2016) estudaram a influência que a velocidade de entrada do ar nos sistemas de arrefecimento a ar tem na distribuição de temperatura de maçãs. Para tal, modelaram o arrefecimento por convecção forçada de maçãs individuais considerando simultaneamente o processo de transmissão de calor e de escoamento. Consideraram-se as velocidades de escoamento de 0,5, 1, 2, 2,5 e 3 m/s. O aumento da velocidade de escoamento aumenta a taxa de arrefecimento e fluxo de calor ao longo da superfície das maçãs, reduzindo assim o tempo necessário de arrefecimento. Verificou-se que para valores acima dos 2,5 m/s de velocidade de escoamento não se verifica uma redução significativa no tempo de arrefecimento. Comparou-se também, na simulação, a diferença da variação da temperatura quando se considera ou não o calor de respiração, verificando-se diferenças desprezáveis nos valores de temperatura. A validação do modelo computacional foi feita através da comparação com resultados obtidos experimentalmente, verificando-se consistência entre os resultados da simulação e os resultados experimentais.

#### **1.4. Objetivos e contribuição da dissertação**

São objetivos da presente dissertação:

- Desenvolvimento de um modelo computacional que permita reproduzir o comportamento térmico do pêssego durante o processo de arrefecimento na fase da pós-colheita.
- Recolher informação experimental relativa à variação da temperatura do pêssego ao longo do tempo para dois casos de arrefecimento, arrefecimento a ar (câmara fria) e arrefecimento a água.

- Validação do modelo computacional desenvolvido com informação experimental.
- Realização de estudos de estudos paramétricos que permitam aferir o modo como a dimensão do pêssego, a temperatura inicial, o tipo e temperatura do fluido de arrefecimento afetam o tempo de arrefecimento do pêssego na pós-colheita.
- Desenvolvimento de correlações a partir da informação obtida nos estudos paramétricos.

A presente tese pretende assim contribuir para um melhor conhecimento do processo de arrefecimento na pós colheita disponibilizando correlações para a obtenção de dois instantes de tempo distintos: Tempo de Meio Arrefecimento (quando os produtos são arrefecidos até 50% da sua temperatura inicial) e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (quando os produtos são arrefecidos até 87,5% da sua temperatura inicial, sendo esta a temperatura habitualmente indicada para o armazenamento dos produtos em câmaras de conservação.

### **1.5. Visão geral e organização da dissertação**

A presente dissertação é composta por cinco capítulos distintos. No primeiro e presente capítulo é incluído um enquadramento geral sobre o tema do trabalho a ser desenvolvido. É posteriormente exposto o problema em estudo, e o porquê de este ser relevante e merecer ser estudado. Na revisão bibliográfica apresentam-se alguns trabalhos sobre outros autores acerca do tema em estudo. De forma a finalizar o capítulo, expuseram-se os objetivos e contribuição da dissertação.

No Capítulo 2 é definido o que é o pré-arrefecimento e também referida a importância do pré-arrefecimento na fase de pós-colheita. São também expostos os processos fisiológicos referentes às frutas e vegetais. São apresentados em maior pormenor os arrefecimentos a ar e a água. São explicitadas as equações que regem o estudo da Transmissão de Calor e a sua aplicabilidade ao tema da presente dissertação.

No Capítulo 3 é feita uma introdução ao software de modelação computacional COMSOL Multiphysics versão 5.2b, sendo feita uma explicação mais detalhada à aplicabilidade do módulo embutido de transmissão de calor em sólidos no tema da presente dissertação. Ainda no capítulo 3 exhibe-se a validação do modelo computacional, para isso apresentam-se os resultados obtidos experimentalmente para casos de arrefecimento a ar e a água e a validação do modelo computacional para cada um deles. No final do capítulo é realizada a comparação do modelo computacional desenvolvido com os resultados obtidos a partir da utilização da resolução analítica para o caso de condução de calor em regime transitório numa esfera unidimensional.

No Capítulo 4, intitulado de Estudo de Casos, é utilizado o modelo computacional desenvolvido no Capítulo 3, na realização de diversos estudos paramétricos e construção de correlações que têm em conta o efeito da variação do diâmetro, o efeito da variação da temperatura de entrada, o efeito da variação da temperatura do fluido de arrefecimento, e o efeito do tipo de fluido utilizado.

A tese fecha com o Capítulo 5 no qual é feita uma recapitulação do trabalho desenvolvido, onde são apresentadas as principais conclusões e são dadas sugestões para a realização de trabalho futuro.



## 2. O arrefecimento na pós-colheita

No presente capítulo irá ser abordada a necessidade do arrefecimento na fase de pós-colheita. Irão ser expostos vários tipos de arrefecimento disponíveis, dando-se mais ênfase aos que são referidos nos capítulos 3 e 4 da presente dissertação, o arrefecimento a ar e arrefecimento a água (*Hydrocooling*) e os vários tipos de arrefecimento a ar (natural e forçado) e a água (chuveiro e imersão, embora só tenha sido utilizado o de chuveiro). Serão também referidos o *hydaircooling* (equiparável a uma junção entre *hydrocooling* e arrefecimento forçado a ar), e o arrefecimento a vácuo (método alternativo capaz de arrefecer rapidamente os produtos alimentares), pois são práticas comuns na indústria do pré-arrefecimento. De forma a salientar a importância do arrefecimento na pós-colheita, e a influência da temperatura na qualidade e tempo de vida dos produtos alimentares, serão também descritos os mecanismos fisiológicos inerentemente dependentes da temperatura ocorrentes nas frutas e vegetais (F&V) (a transpiração, a respiração e o efeito do etileno). Finalmente, irão ser representados métodos para estimar o tempo de pré-arrefecimento, abordando primeiramente a condução de calor em regime transitório, partindo da equação de calor na sua forma diferencial, para o caso de uma esfera (sólido geométrico que mais se assemelha à geometria do modelo). Serão também expostos o método capacitivo e a sua validade de aplicação, o conceito de Tempo de Meio Arrefecimento (técnica de previsão de decaimento de temperatura utilizado na indústria) e a sua semelhança com o método capacitivo. Por último será também representada a equação de calor em regime transitório, onde é possível obter a distribuição da temperatura em função do tempo e da posição radial.

### 2.1. Pré-arrefecimento

O conceito de pré-arrefecimento (arrefecimento na fase da pós-colheita) foi introduzido pela primeira vez por Powell em 1904. Desde então têm-se dado várias definições: Remoção da carga térmica de campo (calor de respiração e calor sensível) de fruta acabada de colher pré-arrefecimento é realizado de forma a abrandar o metabolismo e conseqüentemente reduzir a deterioração previamente ao seu transporte e armazenamento. Redução imediata da carga térmica de um produto logo após a sua colheita; rápida redução da temperatura de um produto (Senthilkumar, 2015). O pré-arrefecimento é uma das operações mais importantes usadas na manutenção de produtos fruto-hortícolas (Dincer, 1992; Thompson, 2004; Pathare, 2012). Depois da colheita, muitos produtos fruto-hortícolas estão sujeitos à deterioração e torna-se necessário arrefecer estes produtos o mais rapidamente possível (Rao, 1993). O processo de pré-arrefecimento, ao remover a carga térmica de campo, faz com que exista uma diminuição dos efeitos de deterioração e de senescência, mantendo o nível de qualidade dos produtos. Existem vários métodos diferentes de pré-arrefecimento para arrefecer os produtos, que

incluem o arrefecimento ambiente, o arrefecimento a ar forçado, o arrefecimento a água, pacotes preenchidos com gelo, arrefecimento a vácuo, e arrefecimento criogénico (Senthilkumar, 2015). Todos estes métodos usam modos distintos para exercer a sua função de arrefecimento. O arrefecimento ambiente e forçado a ar utilizam ar frio e o arrefecimento a água utiliza água fria. O arrefecimento por pacotes preenchidos com gelo utiliza o contacto direto gelado nos produtos a arrefecer. O arrefecimento a vácuo utiliza a evaporação da água e o arrefecimento criogénico utiliza azoto líquido (Brosnan, 2001). A gestão da temperatura de mercadoria deteriorável começa no seu manuseio correto desde a sua colheita. Regra geral, é recomendável que os produtos hortícolas sejam colhidos de manhã, de forma a que a sua temperatura ainda não tenha sido influenciada com a exposição à radiação solar. Desta forma, no início da colheita, a fruta está naturalmente o mais fria possível. Durante todo o processo, desde o início da colheita até ao seu arrefecimento inicial, a fruta deve ser resguardada, de forma a protegê-la de possíveis ganhos térmicos solares. Uma exceção seria o caso de as F&V serem colhidos ao final do dia, para serem transportados para um mercado local, e arrefecerem então durante as horas mais frias à noite (Thompson, 2004). As instalações e operações destinadas ao pré-arrefecimento requerem uma maior capacidade de arrefecimento e movimentação do meio de arrefecimento do que as câmaras de armazenamento com o objetivo de guardar os produtos alimentares a temperatura constante. Desta forma, o pré-arrefecimento é tratado com uma operação distinta do armazenamento a frio e requer então equipamento específico para ser levado a cabo. O pré-arrefecimento pode ser realizado através de vários métodos distintos, como já referido anteriormente. Os tempos de arrefecimento podem ser desde alguns minutos até 24 horas, para o pré-arrefecimento efetivo das F&V (Fricke, 2006). Existindo vários tipos de pré-arrefecimento distintos disponíveis que são amplamente utilizados, quando algum é escolhido ou é devido a fatores económicos, de conveniência, utilização de equipamento já existente, condições operacionais, ou preferência pessoal, do que a partir de conhecimento dos parâmetros envolvidos nos processos de arrefecimento, de forma a atingir condições ótimas de qualidade, eficiência e economia (Dincer, 1992).

## **2.2. Necessidade do arrefecimento**

Um dos fatores mais importantes que afetam diretamente a qualidade das colheitas frutícolas na fase da pós-colheita é a temperatura. As F&V são organismos vivos, que necessitam ser mantidos como tal na fase de armazenamento pós-colheita. Estes estão sujeitos a processos fisiológicos e patológicos associados à vida. De forma a sustentar atividades químicas e fisiológicas, estes consomem energia através das reservas armazenadas previamente à sua colheita (Brosnan, 2001). Estes deterioram-se continuamente desde o processo da colheita, e a sua capacidade de serem vendidos com sucesso depende na redução da taxa de deterioração, retardando os processos que causam danos e apodrecimento. A perda de qualidade na fase de

pós colheita resulta de processos fisiológicos e biológicos (Mascheroni, 2012). O arrefecimento destes produtos permite reduzir a taxa de respiração, a perda de peso causada pela transpiração, a produção de etileno que é responsável pelo amadurecimento das F&V e o desenvolvimento de micro-organismos responsáveis pelo apodrecimento. A taxa a que estes processos se dão está relacionada fortemente com a temperatura a que as F&V se encontram. A preservação da qualidade destes produtos é quintessencial para o sucesso da indústria da horticultura. Sem o processo de pré-arrefecimento, muitas F&V comuns não estariam disponíveis nem em quantidade nem em qualidade (Mitchell, 1972; Gast, 1991). Depois da colheita, vários produtos fruto-hortícolas estão sujeitos à deterioração e torna-se necessário arrefecê-los o mais rapidamente possível. Um fator importante que muitas vezes não é realçado quando se considera o arrefecimento de produtos fruto-hortícolas, é o tempo de atraso entre a colheita e o início do pré-arrefecimento (Senthilkumar, 2015). O atraso do início do processo de pré-arrefecimento aumenta água perdida, baixa a firmeza dos tecidos e aumenta as atividades metabólicas nas frutas. A maioria destes produtos perecíveis têm um tempo de vida mais prolongado quando mantidos perto dos 0°C. Quando a temperatura a que estão sujeitos é superior à temperatura ótima, a taxa de deterioração aumenta duas a três vezes por cada aumento de 10°C na temperatura (Fricke, 2006). Por exemplo, as maçãs amadurecem tanto durante um dia a 21°C como durante 10 dias a -1°C. Isto demonstra a importância do pré-arrefecimento e da sua utilização antecipada logo após a colheita, na maximização do tempo de vida das frutas e vegetais. É necessário não só arrefecer os produtos, mas também arrefecê-los o mais rapidamente possível na fase de pós-colheita (Kader, 2013; Becker, 1996).

### **2.3. Processos fisiológicos das F&V**

Como foi referido no subcapítulo 2.2 a qualidade e o tempo de vida das F&V estão intrinsecamente dependentes da temperatura e da humidade relativa do ambiente em que estas se encontram. Assim, é relevante perceber os mecanismos fisiológicos base, dependentes da temperatura e humidade relativas, que influenciam o tempo de vida e qualidade das F&V. Sendo estes a transpiração, a respiração, e o efeito do etileno.

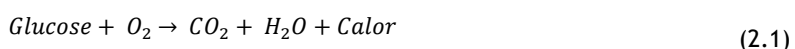
#### **2.3.1. Transpiração**

A transpiração é o processo pelo qual F&V frescos perdem humidade. Este processo consiste no transporte da humidade através da pele do produto, a evaporação da humidade da superfície do produto, e conseqüente transporte convectivo de massa da humidade para o ambiente. Durante a fase de manuseamento e armazenamento pós-colheita, as frutas e vegetais frescos perdem humidade através da sua pele pelo processo de transpiração, pois como já não estão unidos à sua planta-mãe, torna-se impossível a reposição da água perdida. Se a perda de água for muito elevada, o peso total dos produtos diminui, e também pode ocorrer o deterioramento

dos produtos, manifestando-se através do enrugamento e sabor empobrecido. De forma a minimizar o mecanismo de transpiração, os produtos devem ser armazenados num ambiente de baixa temperatura e elevada humidade. Também podem ser aplicadas camadas protetoras e à prova de humidade na superfície dos frutos durante a fase de empacotamento, com o intuito de reduzir a transpiração, e assim aumentar o tempo de vida dos produtos (Becker, 1996; ASHRAE, 2010).

### **2.3.2. Respiração**

A atividade metabólica das F&V continua após a sua colheita. A respiração é o processo químico através do qual as F&V convertem açúcares e oxigénio em dióxido de carbono, água e calor:



O tempo de vida de armazenamento de um produto é dependente da sua atividade de respiração. Quando um produto é armazenado num ambiente de temperatura reduzida, a sua atividade de respiração é reduzida e a sua senescência retardada, aumentando assim o seu tempo de vida. O calor gerado pelo processo de respiração tende a fazer com que a temperatura do produto aumente, aumentando consequentemente a temperatura do vapor de água por baixo da superfície deste. Devido a este incremento de temperatura proveniente do processo de respiração, é consequentemente acentuado o processo de transpiração, pois a superfície com o aumento de temperatura promove a transferência de humidade (Becker, 1996; ASHRAE, 2010; Dincer, 2000).

### **2.3.3. Efeito do etileno**

O gás etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) é produzido por todas as plantas, e tanto pode ter efeitos benéficos como prejudiciais nas frutas e vegetais na fase de pós-colheita. Este gás induz o amadurecimento nas frutas e vegetais e também a senescência (perda da cor verde, queda de folhas, entre outros), noutros tecidos vegetais. A taxa de produção do etileno está dependente da temperatura, por isso, um arrefecimento rápido e gestão da temperatura são essenciais de forma a limitar os efeitos do gás no processo de amadurecimento (Mitchell, 1972). A redução de temperatura nos produtos colhidos tem a vantagem de reduzir a produção e sensibilidade dos produtos ao etileno. O etileno acelera a maturação dos produtos e a sua senescência. Logo, quanto mais rapidamente a carga térmica de campo for removida dos produtos, o mais rapidamente é possível retardar estes processos deteriorantes, e é possível preservar durante mais tempo a qualidade inicial dos produtos (Senthilkumar, 2015).

## **2.4. Escolha de métodos de pré-arrefecimento**

A escolha de um método específico de pré-arrefecimento é determinada por diversos fatores, tais como: taxa de arrefecimento necessária, compatibilidade de método de arrefecimento com os produtos a arrefecer, condições de armazenamento e envio, e custos de equipamento e operação. No caso do pré-arrefecimento, o calor sensível da fruta (ou a carga térmica de campo) é transferido para o meio de arrefecimento. A taxa de transferência de calor é crítica para a remoção desta carga térmica sensível e depende, entre outros, de três fatores: tempo, temperatura e qualidade do contacto. De forma a ser possível atingir o arrefecimento máximo, os produtos a arrefecer têm de permanecer no meio de arrefecimento durante tempo suficiente para remover a sua carga térmica. O meio de arrefecimento (ar, água, gelo picado, entre outros) deve ser mantido a temperatura constante durante o tempo necessário para o arrefecimento (Senthilkumar, 2015). Se o sistema de arrefecimento não for convenientemente dimensionado, de forma a arrefecer adequadamente os produtos, a temperatura do meio de arrefecimento vai subir ao longo do tempo. O meio de arrefecimento também tem de estar em contacto com a superfície dos produtos a arrefecer. Idealmente cada produto deve estar, de forma individual, sujeito ao contacto com o meio de arrefecimento, de forma a promover um arrefecimento uniforme do produto. Os vários tipos de arrefecimento têm diferentes capacidades de remoção de carga térmica (Pathare, 2012). O pré-arrefecimento pode ser realizada no campo, em centrais de arrefecimento, ou na fase de empacotamento nas embaladoras. Enquanto alguns produtos podem ser arrefecidos por qualquer um destes métodos sem sofrerem qualquer alteração na sua qualidade, existem outros que podem ser afetados de forma adversa dependendo do tipo de arrefecimento empregue (Brosnan, 2001). A escolha quanto ao tipo de arrefecimento utilizado é influenciada através dos fatores referidos nos subcapítulos seguintes.

### **2.4.1. Natureza do produto a arrefecer**

Diferentes tipos de produtos fruto-hortícolas têm diferentes necessidades de arrefecimento. Por exemplo, os morangos e os brócolos necessitam de temperaturas perto do ponto de congelamento, enquanto as abóboras e os tomates seriam danificados se fossem sujeitos a essas temperaturas. Alguns produtos são suscetíveis à criação de bolor, por isso não é recomendado a utilização do arrefecimento a água (Brosnan, 2001).

### **2.4.2. Requerimentos quanto ao empacotamento**

A escolha do método de arrefecimento também é fortemente influenciada pelo tipo de empacotamento utilizado. Os produtos hortofrutícolas podem estar armazenados em caixas, sacos ou caixotes. Cada um destes tipos de armazenamento irá influenciar e alterar o tipo de arrefecimento usado para remover rapidamente a carga térmica dos produtos a arrefecer

(Brosnan, 2001). A eficácia do arrefecimento e a taxa a que este acontece estão dependentes do tipo de empacotamento: área permeável ao escoamento, formato, posição, entre outros (Han, 2015).

A eficiência do processo de arrefecimento, a diferença de pressão do ar ao longo dos produtos a arrefecer e as aberturas nas embalagens são responsáveis pela quantidade de energia necessária para efetuar o processo de pré-arrefecimento. O tipo de empacotamento é importante de forma a que o fluido de arrefecimento esteja distribuído de forma uniforme na superfície dos produtos hortofrutícolas. As embalagens devem ser abertas o tempo suficiente para permitir uma circulação rápida e uniforme do ar em torno dos produtos a arrefecer (Vigneault, 2007; Pathare, 2012).

### **2.4.3. Escoamento de produtos**

Algumas técnicas de arrefecimento são mais rápidas do que outras, logo cada técnica tem uma taxa de processamento de produtos hortofrutícolas diferente. Se o volume de produtos que devem ser arrefecidos por época, por dia, ou por hora for elevado, torna-se necessária a utilização de técnicas de arrefecimento mais rápidas, de forma a ser possível atingir o *output* de produtos arrefecidos necessário (Brosnan, 2001).

## **2.5. Arrefecimento a ar**

Comparativamente aos sistemas de arrefecimento a água, os sistemas de arrefecimento a ar são simples e de fácil manutenção. Não são tão eficazes como os sistemas de arrefecimento a água e, comparativamente a estes, o tempo de arrefecimento dos produtos dá-se de forma muito mais demorada. Isto traduz-se em coeficientes convectivos de ordem mais reduzida do que aqueles que é possível obter através do arrefecimento a água ou a vácuo (Sargent, 1988).

### **2.5.1. Arrefecimento em câmaras frias**

O método mais simples, mas também mais lento de arrefecimento é o arrefecimento em câmaras frias, onde os produtos são arrefecidos em grandes quantidades, durante várias horas ou dias, usando ar frio. O arrefecimento de produtos hortofrutícolas em câmaras de armazenamento é um método bem estabelecido e utilizado na fase de pré-arrefecimento. O ar é circulado através das ventoinhas colocadas nas serpentinas do evaporador. Este método consiste na colocação dos produtos a arrefecer em caixas (madeira, fibra ou plástico), contentores a granel, ou outro tipo de empacotamentos numa câmara fria, onde os produtos são então expostos ao ar frio. Contentores com respiradouros e um empilhamento otimizado são essenciais para minimizar a obstrução da passagem do ar frio. Desta forma promove-se um arrefecimento uniforme dos produtos. O arrefecimento em câmaras frias só é satisfatório para produtos com baixa taxa de respiração, tais como cebolas e batatas maduras (Sargent, 1988);

Brosnan, 2001; Borompichaichartkul, 2009). O arrefecimento em câmaras de ar frio, embora seja utilizado na maioria dos produtos hortofrutícolas, é um processo de pré-arrefecimento bastante moroso. O arrefecimento em câmaras de arrefecimento é na maioria dos casos inadequado para produtos armazenados em contentores de grandes dimensões, tais como silos ou paletes. Como o calor é primeiramente removido dos produtos perto da periferia do empacotamento, ao invés do centro, o calor que é gerado através da respiração é muitas vezes superior ao calor removido por este método. Isto faz com que a temperatura dentro da câmara de arrefecimento aumente ao longo do tempo (Borompichaichartkul, 2009). É necessário um dimensionamento adequado da câmara de arrefecimento e do equipamento, de forma a que o arrefecimento por câmara de arrefecimento se processe de forma eficaz. O equipamento de arrefecimento deve ser capaz de arrefecer os produtos hortofrutícolas frescos num espaço de 24 horas e de manter a temperatura de armazenamento dos produtos. Normalmente, é necessário equipamento com maior capacidade de arrefecimento para arrefecer os produtos do que para os manter a uma determinada temperatura (Gast, 1991). Existe uma potencial poupança energética para este tipo de pré-arrefecimento. Nos produtos onde seja adequada a utilização de arrefecimento em câmaras frias, a remoção da carga térmica dos produtos é realizada ao longo de um maior período de tempo. Assim, os requisitos quanto ao fluxo de ar não são tão elevados como os do arrefecimento a ar forçado. (Brosnan, 2001).

### **2.5.2. Arrefecimento a ar forçado**

Devido à sua natureza simples, económica, sanitária e relativa não corrosividade para com o equipamento, o arrefecimento a ar forçado é uma das técnicas mais utilizadas para o pré-arrefecimento de vários produtos. Algumas das suas maiores desvantagens são o perigo de causarem desidratação severa dos produtos e possível congelamento dos mesmos, se forem utilizadas temperaturas do ar abaixo dos 0°C (Dincer, 2000). O arrefecimento a ar forçado foi desenvolvido de forma a ser possível extrair rapidamente o calor de campo dos produtos, logo após a sua colheita. O arrefecimento a ar forçado (ou arrefecimento à pressão) é uma modificação do arrefecimento por câmara fria, e é levado a cabo ao sujeitar os empacotamentos de produtos a uma pressão do ar mais elevada num lado do empacotamento do que no outro. Esta técnica possibilita que o ar atravesse os empacotamentos em vez de escoar à volta destes. De forma a que este tipo de arrefecimento seja realizado com eficácia, é necessário que os empacotamentos contenham orifícios para promoverem a passagem do ar e que estes estejam colocados na direção do escoamento. Também é recomendado minimizar a quantidade de materiais que se oponham ao movimento livre do ar dentro dos empacotamentos. Devido ao facto de o ar arrefecido entrar em contacto diretamente com os produtos a arrefecer, o processo de arrefecimento dá-se de uma maneira muito mais rápida, comparativamente ao arrefecimento por câmara fria. Isto faz com que exista uma rápida

remoção do calor de campo, o que leva a que exista uma movimentação dos produtos mais rápida durante o processo de arrefecimento (Brosnan, 2001).

Fatores que influenciam a taxa a que se dá o arrefecimento de um produto em particular são o seu tamanho, formato, propriedades térmicas e a sua disposição durante o arrefecimento. Outros fatores incluem temperatura inicial, temperatura final desejada e humidade relativa, temperatura e caudal do ar refrigerante. Como estes fatores afetam a taxa a que se dá o arrefecimento, irão posteriormente afetar diretamente o custo do arrefecimento. Outros fatores que influenciam o custo de arrefecimento são os custos por unidade de espaço de arrefecimento, equipamento de arrefecimento e de condicionamento de ar, energia elétrica, mão de obra, custos financeiros e tempo de operação por ano. Na prática, muitos sistemas de arrefecimento não atingem a quantidade de arrefecimento necessário e/ou não operam de forma mais rentável e económica possível, resultando em desperdício energético (Dincer, 2000).

## **2.6. Arrefecimento a água**

O arrefecimento a água é um método comumente utilizado de forma a remover rapidamente a carga térmica de campo das frutas e vegetais, onde estes são ou aspergidos com água gelada ou imersos num banho agitado de água gelada. Este método tem diversas vantagens, tais como simplicidade, eficácia, rapidez e custo. Apresenta, contudo, algumas desvantagens:

- Empacotamento e dificuldades com o manuseio dos produtos a arrefecer (os produtos são removidos do sistema de arrefecimento num estado muito húmido);
- Contaminação com detritos provenientes do solo, plantas, seiva e com organismos causadores de doenças (pois a água é mantida em recirculação para preservar o efeito de arrefecimento);
- Problemas derivados de efluentes (devido à eliminação da água utilizada para o arrefecimento).

Assim, devido à tendência de causar efeitos fisiológicos e patológicos em alguns produtos, o uso do arrefecimento a água é limitado para alguns tipos de produtos. Sendo assim, é necessária uma sanitização adequada da água do *hydrocooler* para prevenir infeções bacterianas nos produtos.

O tipo de sistema de arrefecimento a água a utilizar depende de (Dincer, 1997; Mascheroni, 2012):

- Produto a arrefecer, se se encontram a granel ou em contentores para transporte
- Do tipo de contentor, se é manuseado individualmente ou em unidades de cargas

Os produtos a arrefecer com este método são ou imersos, ou alagados, ou aspergidos com água fria (perto dos 0°C). O método de alagamento consiste em borrifar os produtos com uma quantidade generosa de água fria.

Existem duas técnicas básicas de arrefecimento a água pelo processo de imersão: por escoamento de água, e por sistema de lotes. No processo de escoamento de água, os produtos a arrefecer são sujeitos a um escoamento contínuo num túnel de arrefecimento, quer em empacotamento quer em lotes a granel. O arrefecimento neste processo é efetuado através de alagamento, aspergimento, imersão, ou partes de cada um destes processos, dependendo do tipo de refrigerador a água utilizado. No arrefecimento por sistema de lotes, os produtos ou lotes a arrefecer são simplesmente arrefecidos em tanques de arrefecimento de água. A Figura 2.1 demonstra um sistema que consiste numa unidade de arrefecimento mecânica convencional, e um tanque de arrefecimento.

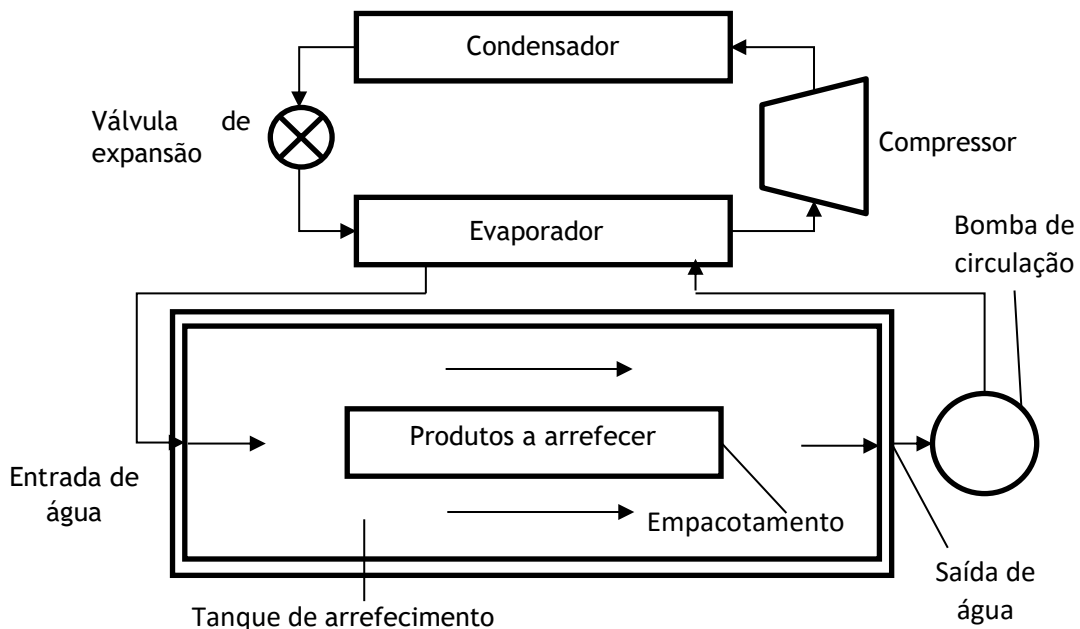


Figura 2.1 - Unidade de arrefecimento mecânico

O arrefecimento a água é um processo rápido, pois a água arrefecida, ao escoar em torno dos produtos, faz com que a temperatura de superfície destes se torne igual à da água arrefecida em volta, pois como a capacidade térmica da água arrefecida é superior à do ar, o mesmo volume de água é capaz de remover mais calor, à mesma temperatura do que o mesmo volume de ar. Desta forma, a resistência à transmissão de calor na superfície dos produtos a arrefecer torna-se desprezável. A taxa a que o arrefecimento se dá no interior dos produtos é limitada pela taxa a que o calor é transmitido do seu interior para a superfície, dependendo então da relação do volume para a sua área de superfície, e também das suas propriedades térmicas.

Assim, para o mesmo tipo de produto, o valor do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento irá variar para calibres diferentes do mesmo (ASHRAE, 2010).

O arrefecimento a água também apresenta a vantagem de os produtos arrefecidos não sofrerem perdas de humidade e até, nalguns casos, podem reidratar-se alguns produtos ligeiramente esmorecidos. No ponto de vista do consumidor a qualidade dos produtos submetidos a este tipo de arrefecimento é elevada e, do ponto de vista do produtor, o peso vendável é mais elevado, comparado a outras técnicas de pré-arrefecimento, tais como o arrefecimento por vácuo e ar, pois podem levar a perdas significativas no nível de humidade nos produtos e consequente esmorecimento, reduzindo assim a qualidade dos produtos e peso vendável dos mesmos (ASHRAE, 2010; Dincer, 2000; Mascheroni, 2012).

### **2.6.1. Tipos de Hydrocooler**

Os sistemas de *hydrocooling* podem ser divididos em duas categorias: chuveiro ou imersão. Os métodos utilizados diferem entre si pelas taxas de arrefecimento e rendimento geral do processo de arrefecimento. As diferenças entre as técnicas de *hydrocooling* utilizadas são evidentes pelo método de arrefecimento e pela maneira como os produtos são movimentados ou dispostos no *hydrocooler* em questão (Brosnan, 2001; Dincer, 2000).

#### **2.6.1.1. Chuveiro**

O design de *hydrocoolers* pode ser dividido em duas categorias: chuveiro e imersão. Num *hydrocooler* de tipo chuveiro, os produtos a arrefecer passam sob um chuveiro de água gelada, o que é tipicamente conseguido pela utilização de uma bandeja perfurada alagada com água gelada. A gravidade força a água através da bandeja perfurada e sobre os produtos. Os *hydrocoolers* do tipo chuveiro podem conter correias transportadoras de forma a haver um fluxo contínuo de produto, ou podem ser operados em modo de lote. As taxas de fluxo de água variam tipicamente entre  $0.69 \frac{l}{s}$  a  $1.34 \frac{l}{s}$  por metro quadrado de área de arrefecimento.

Um problema com esta técnica de arrefecimento é que é o arrefecimento não é obtido de forma uniforme, deixando frequentemente pontos quentes nos produtos. Para esta técnica de *hydrocooling* ser eficiente, o contacto entre a água gelada e os produtos tem de ser o mais uniforme possível. Isto pode não ser conseguido através desta técnica de arrefecimento, pois a água gelada pode não ser distribuída de forma equivalente ao longo da carga de produtos a arrefecer, resultando no sub-arrefecimento de alguns produtos (Brosnan, 2001).

Na Figura 2.2 encontra-se representado esquematicamente um *hydrocooler* do tipo chuveiro.

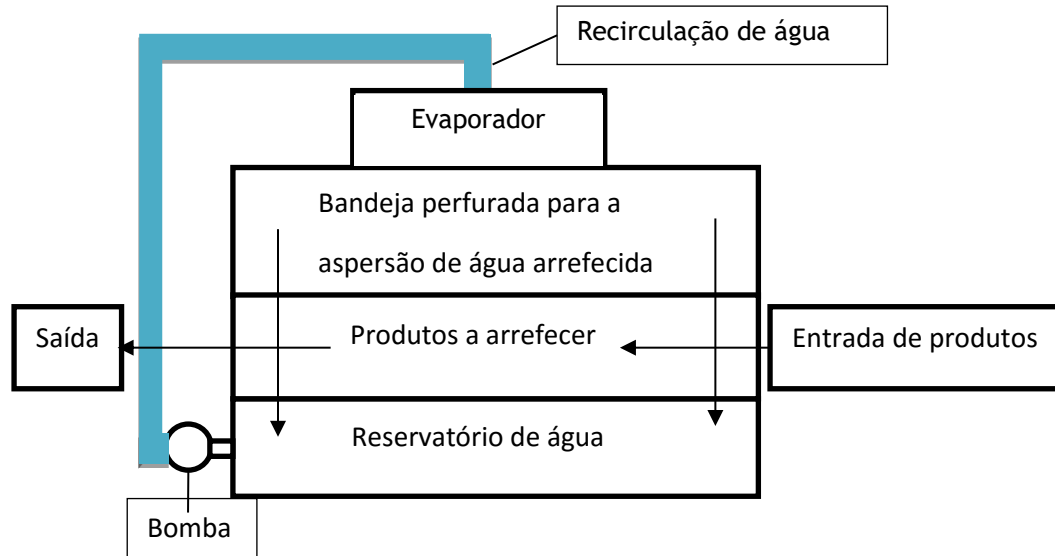


Figura 2.2 - Hydrocooler do tipo chuveiro

### 2.6.1.2. Imersão

Este tipo de arrefecimento consiste na utilização de tanques pouco profundos que contêm água arrefecida agitada. Os produtos são carregados numa extremidade, são transportados ao longo do comprimento do tanque, estando imersos em água fria, e mantém-se imersos até o mecanismo de transporte inclinado os remover gradualmente da água fria. Os produtos arrefecidos são finalmente removidos na extremidade oposta (Brosnan, 2001). Para o *hydrocooling* do tipo de imersão, a velocidade da água varia tipicamente entre  $76$  a  $102 \frac{mm}{s}$ . Em instalações de empacotamento de grandes dimensões, são utilizados sistemas de arrefecimento com amónia para arrefecer a água utilizada no sistema de *hydrocooler* através de permutadores de calor. As serpentinas são colocadas diretamente num tanque onde a água é circulada rapidamente. A temperatura do líquido de arrefecimento nas serpentinas está tipicamente a  $-2,2^{\circ}\text{C}$ , produzindo água gelada a  $1.1^{\circ}\text{C}$ . Devido aos elevados custos de aquisição e operação de unidades mecânicas de arrefecimento, a sua utilização está limitada, tipicamente, para operações de *hydrocooling* de meio a alto volume. Operações de baixo volume podem usar gelo picado em vez de arrefecimento mecânico para produzir água arrefecida. Tipicamente, grandes blocos de gelo são esmagados e triturados para serem posteriormente adicionados ao reservatório de água do *hydrocooler* (ASHRAE, 2010). Na Figura 2.3 está representado esquematicamente um *hydrocooler* do tipo imersão (ASHRAE, 2010).

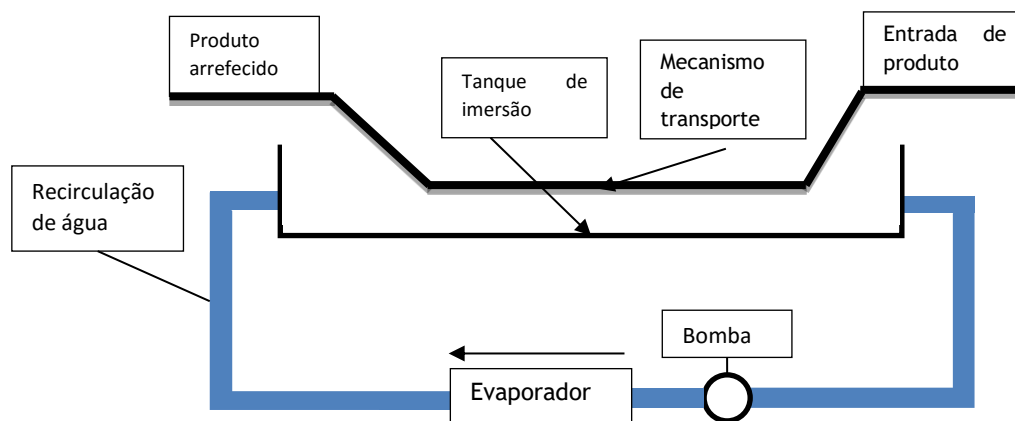


Figura 2.3 - Hydrocooler do tipo imersão

### 2.6.2. Eficiência dos hydrocoolers

O rendimento dos *hydrocoolers* é reduzido através dos ganhos térmicos para a água provenientes do ar envolvente. Outras cargas térmicas que também reduzem a eficiência dos *hydrocoolers* são as cargas solares, radiação de superfícies quentes, e transmissão de calor por condução da envolvente. A proteção do *hydrocooler* destas fontes de calor melhora a eficiência deste (Mascheroni, 2012). Os seguintes fatores estão associados a um aumento do rendimento do *hydrocooler*, durante o projeto e a operação do mesmo (ASHRAE, 2010):

- Aplicação de isolamento em todas as superfícies arrefecidas, de forma a proteger o *hydrocooler* de potencial vento e exposição solar direta;
- Utilização de cortinas de plástico em tira na entrada e na saída do mecanismo de transporte do *hydrocooler*, de forma a reduzir os ganhos térmicos por infiltração;
- Utilização de armazenamento térmico, onde água gelada ou gelo são produzidos e armazenados durante os períodos de baixa demanda energética, de forma a serem utilizados posteriormente no arrefecimento da água do *hydrocooler* nos períodos de maior demanda energética. A utilização de armazenamento térmico torna possível reduzir o tamanho necessário para o equipamento de arrefecimento, podendo reduzir custos energéticos;
- Utilizar um reservatório de água de tamanho adequado, de forma a minimizar o desperdício de água aquando a troca da água do *hydrocooler*. Por outro lado, pode-se tornar difícil manter uma temperatura e caudal constantes da água do *hydrocooler* se o reservatório de água for pequeno demais.

É possível atingir uma elevada eficiência energética num *hydrocooler* devido à sua capacidade térmica e elevadas taxas de transmissão de calor devido à utilização de água agitada (sendo

possível atingir valores de coeficiente convectivo na ordem de  $500 \text{ W/m}^2\text{K}$ , em comparação com os  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$  característicos do ar lento em movimento). Devido ao custo relativamente alto dos *hydrocooler*, para se justificar economicamente a utilização destes é necessário que ele seja empregue durante períodos consideráveis de tempo ao longo do ano (Mascheroni, 2012).

### **2.6.3. Tratamento de água dos hydrocoolers**

A área molhada de superfície dos produtos providencia um ambiente propício para o desenvolvimento de doenças. Para além disto, devido ao facto de a água utilizada nos *hydrocoolers* se encontrar em recirculação, organismos decompositores podem-se acumular na água do *hydrocooler* e espalhar-se para outros produtos que também estejam a ser arrefecidos. De forma a colmatar esta falha, a água do *hydrocooler* deve ser desinfetada com desinfetantes leves. A água utilizada nos sistemas de *hydrocooler* é tratada com cloro para minimizar os níveis de organismos decompositores. O cloro é adicionado à água do sistema, tipicamente ao nível de 50 a 100 ppm. No entanto a adição do cloro à água do *hydrocooler* só é eficaz na remoção de organismos a um nível superficial, não sendo eficaz na neutralização dos mesmos no interior dos produtos. O nível de cloro na água do *hydrocooler* deve ser verificado periodicamente, de forma a garantir que é mantida a concentração correta. O cloro é volátil e dispersa-se no ar a uma taxa que é dependente do aumento de temperatura. Além disso, se for utilizado gelo para o arrefecimento dos produtos, o seu derretimento na água do *hydrocooler* irá diluir o cloro na solução. De forma a minimizar a acumulação de detritos na água do *hydrocooler*, pode ser necessário lavar primeiro os produtos antes de os colocar no sistema. Não obstante, a água do *hydrocooler* deve ser substituída diariamente, ou com mais frequência se necessário. Para além da substituição diária da água do *hydrocooler*, também se deve ter especial atenção para o resto do equipamento, tal como as bandejas perfuradas, para o sistema funcionar com o melhor rendimento possível (ASHRAE, 2010; Mascheroni, 2012).

## **2.7. Hydrair Cooling**

Este sistema utiliza uma combinação dos sistemas referidos anteriormente, o arrefecimento a ar e o arrefecimento a água. O *hydraircooling* é um método eficiente de pré-arrefecimento, em aplicações onde a perda de humidade dos produtos não é desejável. Este sistema foi introduzido devido ao facto de muitos vegetais antes de serem transportados serem sujeitos previamente ao arrefecimento em *hydrocooler*, sendo utilizada uma elevada quantidade de água. Os sistemas de *hydrocooler* são razoavelmente eficientes, mas por vezes deixam “pontos quentes” nos produtos, devido à possível natureza do empacotamento utilizado. O *hydraircooling* consiste na aplicação de uma mistura de água gelada com ar nos produtos a arrefecer. É particularmente eficiente no arrefecimento de vegetais em paletes, e é utilizado em produtos fruto-hortícolas que não são usualmente *hidro*-arrefecidos. Quando o ar frio passa através dos produtos que estão a ser continuamente aspergidos com água gelada, existe um

arrefecimento mais eficaz destes sem os inconvenientes da perda de humidade, comparativamente ao arrefecimento forçado a ar, por exemplo (Dincer, 2000; Rao, 1992; Rao, 1993). Este sistema utiliza menos água para realizar o arrefecimento do que os sistemas de *hydrocooler* e conseqüentemente é reduzida a manutenção necessária para manter limpa a água limpa. As taxas de arrefecimento são equiparáveis às obtidas através da utilização de *hydrocoolers* convencionais e em alguns casos até são superiores. Comparativamente ao arrefecimento forçado a ar, o *hydaircooling* reduz o tempo de arrefecimento e também limita as perdas de peso dos produtos, pelo que esta técnica permite reduzir o decaimento de qualidade devido à desidratação dos produtos (ASHRAE, 2010; Mascheroni, 2012). À semelhança do processo de arrefecimento a água, também a água utilizada nos sistemas de *hydroaircooling* necessita de ser tratada. Como a superfície molhada dos produtos é um ambiente propício para o desenvolvimento de doenças, e os micro-organismos podem proliferar na água em recirculação no sistema, deve ser feito o tratamento com cloro de forma a minimizar os níveis de organismos causadores de podridão (Mascheroni, 2012).

## **2.8. Arrefecimento a vácuo**

O arrefecimento a vácuo é um método alternativo de rápida remoção do calor de campo dos produtos (porosos e com quantidade significativa de humidade) de forma a arrefecê-los à temperatura de armazenamento. Os componentes chave para a utilização do arrefecimento a vácuo são uma câmara de armazenamento de elevada resistência e dimensões, um dispositivo de redução de pressão, e um dispositivo condensador de água (Dincer, 2000; Wang, 2001). O arrefecimento a vácuo é conseguido através da evaporação da humidade dos produtos. A evaporação é tornada mais eficiente através da redução da pressão ao ponto onde a evaporação da água ocorre a uma temperatura mais baixa. O tamanho e formato dos produtos a arrefecer não produz efeitos significativos na taxa de arrefecimento desta técnica. É possível atingir um arrefecimento rápido e uniforme nos produtos sujeitos a este tipo de arrefecimento, estando a sua porosidade uniformemente distribuída. Por exemplo, no arrefecimento de produtos empacotados, independentemente de onde um produto esteja localizado no empacotamento ou no contentor, é possível atingir uma distribuição de temperatura, como resultado de o efeito de arrefecimento ser produto da evaporação de água nos poros. Comparativamente ao arrefecimento por jatos de ar gelado, é possível que o exterior dos produtos fique danificado devido ao congelamento, e mesmo assim o seu interior ter uma distribuição de temperatura inadequada (ASHRAE, 2010; Mascheroni, 2012; Wang, 2001).

A temperatura de ebulição da água varia conforme a pressão de saturação. À pressão atmosférica a temperatura de ebulição da água é de 100°C. Para valores mais reduzidos de pressão, como 23,37 mbar e 6,09 mbar, a temperatura de ebulição é de 20 °C e 0 °C,

respetivamente. Assim, com a passagem da água do estado líquido para vapor, o calor sensível é removido do produto a arrefecer (Brosnan, 2001):

A maioria das frutas e vegetais contém uma elevada quantidade de água. Quando os produtos são sujeitos a um vácuo adequado (5 a 6.5 mbar), alguma desta água evapora, removendo o calor de vaporização do produto e conseqüentemente arrefecendo estes. Para arrefecer os produtos em 10°C é necessário evaporar em média 1.8% do peso do produto, sendo o arrefecimento proporcional à quantidade de água evaporada. Independentemente do produto, é possível arrefecer 5°C adicionais por cada 1% de redução de quantidade de água. A perda de água dos produtos é uma consequência inevitável que ocorre durante o processo de evaporação. No entanto a perda de peso de produtos arrefecidos por vácuo pode ser reduzida, ou compensada através da adição de água previamente ao processo de arrefecimento. O calor necessário para vaporizar a água é removido da superfície dos produtos, logo a taxa de arrefecimento está limitada pela transmissão de calor e massa. A taxa de evaporação da superfície dos produtos depende principalmente da razão entre a área de superfície e o volume ou o peso, da facilidade com que a água é libertada dos tecidos dos produtos, da taxa a que o vácuo é gerado na câmara e da temperatura da carga no início do processo de arrefecimento. O arrefecimento a vácuo funciona de melhor forma com produtos com uma maior razão entre a área de superfície e o volume (Dincer, 2000; Brosnan, 2001; ASHRAE, 2010).

## **2.9. Condução de calor em regime transitório**

Neste subcapítulo referir-se-ão as equações e métodos que regem o decaimento de temperatura em F&V. A equação de calor em regime transitório referente a condução de calor em regime transitório tridimensional. Posteriormente será exibido o exemplo de condução de calor em regime transitório para o caso particular de condução de calor numa esfera, considerando a propagação de calor unidimensional. É também referido o método capacitivo e os casos para o qual este método é aplicável. Por último refere-se o método de “Fração de temperatura não realizada”, um método simples de previsão de decaimento de temperatura comumente utilizado na indústria.

### **2.9.1. Equação da condução de calor**

O arrefecimento de um sólido é um problema de condução de calor em regime transitório. A temperatura é função quer das coordenadas espaciais, quer da coordenada temporal. Este processo de condução é descrito através da equação (Incropera, 2002):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.1)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

Se a condutibilidade térmica for independente da temperatura e posição, a equação pode ser escrita na seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.3)$$

Sendo o termo  $\frac{k}{\rho c_p}$  a difusidade térmica,  $\alpha$ , com  $k$  a condutibilidade térmica  $\left(\frac{W}{mK}\right)$ ,  $\rho$  a massa específica  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ , e  $c_p$  o calor específico  $\left(\frac{J}{kgK}\right)$ .

### 2.9.2. Condução de calor unidimensional numa esfera

Considerando a Figura 2.4, onde se representa esquematicamente uma esfera de raio finito imersa num fluido, à temperatura  $T_{\infty}$ , com o qual existe transferência de calor por convecção.

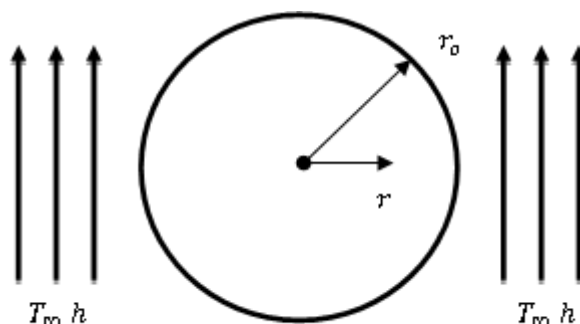


Figura 2.4 - Esfera submetida à convecção em toda a sua superfície

A distribuição da temperatura na esfera em função do tempo e da posição radial ( $r^* = \frac{r}{r_0}$ ) é obtida através da expressão (Incropera, 2002):

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-\zeta_n^2 Fo} \frac{1}{\zeta_n r^*} \text{sen}(\zeta_n r^*) \quad (2.4)$$

Onde

$$\theta^* = \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \quad (2.5)$$

$$C_n = \frac{4(\text{sen}(\zeta_n) - \zeta_n \cos(\zeta_n))}{2\zeta_n - \text{sen}(2\zeta_n)} \quad (2.6)$$

Os valores para  $\zeta_n$  são dados pelas raízes positivas da seguinte equação:

$$1 - \zeta_n \cot(\zeta_n) = Bi \quad (2.7)$$

Onde

$$Bi = \frac{hr_0}{k} \quad (2.8)$$

A série infinita pode ser representada de forma aproximada pelo primeiro termo desde que se verifique,

$$Fo > 0.2 \quad (2.9)$$

Ou seja, para o caso de uma esfera,

$$\frac{\alpha t}{r_0^2} > 0.2 \quad (2.10)$$

A primeira série pode ser representada por

$$\theta^* = \theta_o^* \frac{1}{\zeta_1 r^*} \text{sen}(\zeta_1 r^*) \quad (2.11)$$

Com

$$\theta_o^* = \frac{T_o - T_\infty}{T_i - T_\infty} = C_1 e^{-\zeta_1^2 Fo} \quad (2.12)$$

Onde  $\theta_o^*$  representa a temperatura adimensional no plano de simetria ( $r^* = 0$ ).

### 2.9.3. Método capacitivo

Admitindo que um corpo inicialmente a uma temperatura uniforme,  $T_i$ , é mergulhado num fluido com temperatura inferior,  $T_\infty$ , a evolução da temperatura do corpo pode ser determinada através de um balanço térmico.

Onde (Incropera, 2002):

$$\dot{E}_{st} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_g \quad (2.13)$$

- $\dot{E}_{st}$  a taxa a que a energia é acumulada no corpo

$$\dot{E}_{st} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.14)$$

- $\dot{E}_{in}$  a taxa a que a energia entra no corpo

$$\dot{E}_{in} = q_x + q_y + q_z \quad (2.15)$$

- $\dot{E}_{out}$  a taxa a que a energia sai do corpo

$$\dot{E}_{out} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} \quad (2.16)$$

- $\dot{E}_g$  a taxa a que a energia é armazenada no corpo

$$\dot{E}_g = \dot{q} dx dy dz \quad (2.17)$$

Considerando que não existe geração e entrada de calor no corpo, resulta:

$$\dot{E}_{st} = -\dot{E}_{out} \quad (2.18)$$

E a equação traduz-se em:

$$\rho c_p V \frac{\partial T}{\partial t} = -Ah(T - T_\infty) \quad (2.19)$$

Sendo

$$\theta = T - T_\infty \quad (2.20)$$

A equação fica

$$\rho c_p V \frac{\partial \theta}{\partial t} = -Ah\theta \quad (2.21)$$

Organizando os termos

$$\frac{\rho c_p V \partial \theta}{Ah \partial t} = -\theta \quad (2.22)$$

Integrando a equação

$$\frac{\rho c_p V}{Ah} \int_{\theta_i}^{\theta} \frac{d\theta}{\theta} = - \int_0^t dt \quad (2.23)$$

Resulta

$$\frac{\rho c_p V}{Ah} \int_{\theta_i}^{\theta} \frac{d\theta}{\theta} = - \int_0^t dt \quad (2.24)$$

Onde  $\theta_i = T_i - T_\infty$ , representa a condição inicial, e considerando que as restantes grandezas não dependem da temperatura, fica

$$\frac{\rho c_p V}{Ah} \log\left(\frac{\theta_i}{\theta}\right) = t \quad (2.25)$$

Traduzindo-se em

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-\left(\frac{Ah}{\rho c_p V}\right)t} \quad (2.26)$$

Representa-se na Figura 2.5 o efeito do  $\tau$  na variação da temperatura na sua forma adimensional.

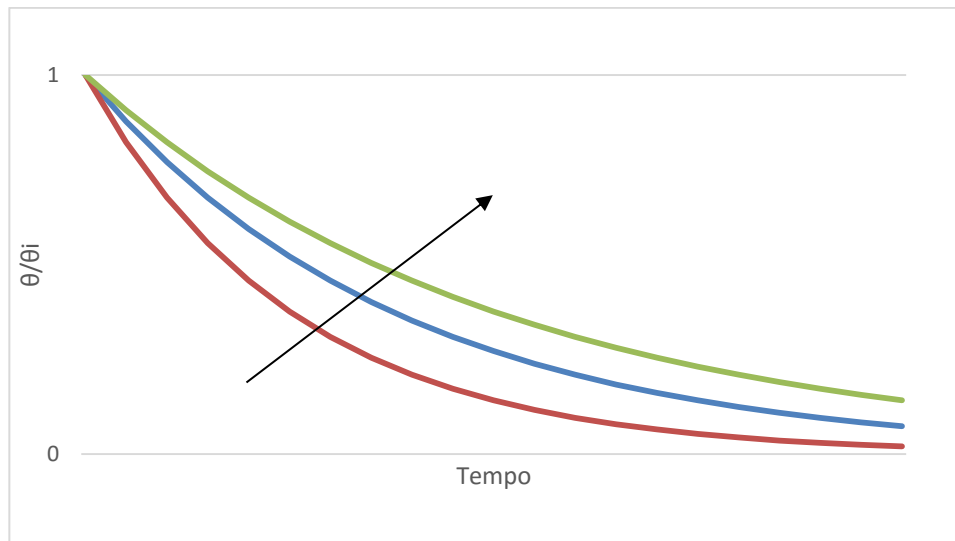


Figura 2.5 - Evolução da temperatura ao longo do tempo com a variação de  $\tau$

A constante de tempo térmica,  $\tau$ , pode ser definida como (Incropera, 2002):

$$\tau = \left(\frac{1}{Ah}\right) (\rho c_p V) \quad (2.27)$$

Onde o termo  $\frac{1}{Ah}$  é a resistência térmica de convecção, e o termo  $\rho c_p V$  é a capacidade térmica do corpo. Se houver um aumento da resistência térmica de convecção através de, por exemplo, diminuição da área ou coeficiente convectivo, ou um aumento de capacidade térmica através do aumento da massa do corpo, verifica-se que o corpo tende a responder mais lentamente (aumento de  $\tau$ ), demorando mais tempo a atingir o equilíbrio térmico.

### 2.9.3.1. Validade do método capacitivo

O método capacitivo é válido desde que os gradientes térmicos no interior do corpo se possam desprezar. Considerando o exemplo de uma parede a ser arrefecida por um fluido, onde a transmissão de calor ocorre em regime permanente, unidimensionalmente segundo a espessura da parede, as propriedades da parede são uniformes e não existe geração de calor no interior da parede, o balanço térmico à superfície da parede adjacente ao fluido pode ser escrito por (Incropera, 2002):

$$q_{cond} = q_{conv} \quad (2.28)$$

onde,

$$\frac{Ak(T_{s1} - T_{s2})}{L} = Ah(T_{s2} - T_{\infty}) \quad (2.29)$$

reorganizando os termos,

$$\frac{T_{s1} - T_{s2}}{T_{s2} - T_{\infty}} = \frac{\frac{L}{Ak}}{\frac{1}{Ah}} = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{hL}{k} = Bi \quad (2.30)$$

Onde  $Bi$  designa o número de Biot. Se o número de Biot for suficientemente pequeno,  $Bi \ll 1$ , corresponde considerar que a resistência térmica de condução é muito inferior à resistência térmica de convecção (ou seja,  $R_{cond} \ll R_{conv}$ ), é possível concluir que a diferença de temperatura no interior do corpo é desprezável em relação à diferença de temperatura da superfície do corpo em relação ao fluido, ou seja,  $(T_{s1} - T_{s2}) \ll (T_{s2} - T_{\infty})$ . Assim, é possível desprezar o gradiente térmico interno, admitindo que a temperatura é uniforme no corpo.

O gradiente térmico pode ser desprezado desde que,

$$Bi = \frac{hL_c}{k} < 0.1 \quad (2.31)$$

Onde  $L_c$  é o comprimento característico e é dado pelo quociente entre o volume ( $V$ ) e área de superfície em contacto com o fluido ( $A$ ) do corpo,

$$L_c = \frac{V}{A} \quad (2.32)$$

No método capacitivo, a evolução da temperatura ao longo do tempo pode ser escrita como

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = e^{-(BiFo)} \quad (2.33)$$

Onde no argumento da exponencial, os dois elementos adimensionais são:

Número de Biot

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (2.34)$$

Número de Fourier

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_c^2} \quad (2.35)$$

#### 2.9.4. Fração de diferencial de temperatura não realizada

Todos os processos de arrefecimento apresentam um comportamento similar entre si. Depois de um atraso inicial, a temperatura no núcleo do produto alimentar decresce exponencialmente com o tempo (ASHRAE, 2010; Becker, 2002).

Quando os frutos quentes são arrefecidos a taxa de arrefecimento não é constante, mas diminui exponencialmente à medida que a diferença de temperatura diminui (seguindo uma função logarítmica, com rápido arrefecimento inicial, seguido de um arrefecimento cada vez mais lento) (Brosnan, 2001). Uma curva de arrefecimento que demonstre este comportamento pode ser ao traçar em eixos semilogarítmicos a diferença de temperatura não realizada em função do tempo.

A relação de temperaturas ( $\theta$ ) é dada por:

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \quad (2.36)$$

Com

- $T_i$  - Temperatura inicial,
- $T_{\infty}$  - Temperatura de escoamento não perturbado,
- $T$  - Temperatura num dado instante de tempo;

Analisando o gráfico resultante deste processo, é possível ver que a temperatura adimensional semilogarítmica consiste numa curva inicial seguida de uma porção linear. Foram propostas fórmulas empíricas simples, tais como o Tempo de Meio Arrefecimento e o *Cooling Coefficient*, de forma a estimar os tempos de arrefecimento de frutas e vegetais (ASHRAE, 2010).

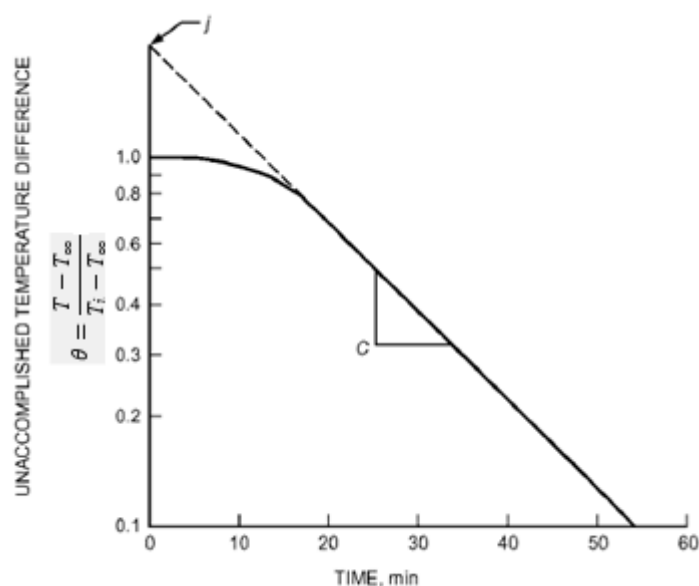


Figura 2.6 - Fração de diferença de temperatura não realizada (ASHRAE, 2010)

### 2.9.5. Tempo de Meio Arrefecimento

Um conceito importante para entender a velocidade de um processo de arrefecimento durante a pós-colheita é o Tempo de Meio Arrefecimento, ou seja, o tempo necessário para que a temperatura a que a fruta vem do campo caia para metade em relação à temperatura de armazenamento. Equivalentemente é também o tempo para reduzir  $Y$  para 0.5. A redução de  $Y$  para 0.125 (7/8) corresponde ao instante de tempo indicado para remover as frutas do processo de pré-arrefecimento e para serem colocadas posteriormente em armazenamento a frio. O produto pode então ser colocado em armazenamento onde o 1/8 restante da temperatura inicial pode ser reduzido gradualmente utilizando menos energia (Brosnan, 2001). A quantidade de calor nos produtos é dependente e governada pela temperatura da sua envolvente. A diferença de temperatura entre produtos acabados de colher e a temperatura ótima de armazenamento indica a quantidade de calor-de-campo. Os produtos fruto-hortícolas são normalmente pré-arrefecidos até Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento ou 88% da diferença de temperatura explicitada anteriormente. O 1/8 de calor restante a ser removido é limitado pelo tempo e energia necessários para reduzir a temperatura dos produtos até à temperatura de armazenamento ótimo (Gast, 1991). Como o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento são independentes da temperatura inicial do produto e são constantes durante todo o processo de arrefecimento, se por exemplo um processo demorar 2h para reduzir a temperatura de um produto em 50%, demorará 2h para a reduzir para 25%, e outras 2h para reduzir para 12.5% (Brosnan, 2001). O Tempo de Meio Arrefecimento é independente da temperatura inicial e mantém-se constante durante o período de

arrefecimento, admitindo que a temperatura de escoamento se mantém constante durante o processo de arrefecimento. Logo, assim que o Tempo de Meio Arrefecimento tenha sido calculado para um produto hortícola em específico, o tempo de arrefecimento pode ser previsto independentemente da sua temperatura inicial e da temperatura do meio envolvente.

O tempo de arrefecimento de frutas e vegetais pode ser determinado sem o recurso a nomogramas através da seguinte expressão:

$$t = -Z * \frac{\ln(\theta)}{\ln(2)} \quad (2.37)$$

Onde (ASHRAE, 2010; Brosnan, 2001):

- t - Tempo de arrefecimento (em minutos)
- Z - Tempo de Meio Arrefecimento
- $\theta$  - Fração de diferencial de temperatura não realizada.

### 2.9.6. Coeficiente de Arrefecimento

O tempo de arrefecimento pode também ser previsto usando o coeficiente de arrefecimento C. Como foi mostrado na Figura 2.6, o coeficiente de arrefecimento é o declive negativo na curva  $\ln(\theta)$  em função do tempo. Esta curva é construída em eixos semi-logarítmicos através de valores obtidos experimentalmente de tempo e temperatura. Este coeficiente de arrefecimento indica a mudança na mudança de fração de temperatura por unidade de tempo de arrefecimento. O coeficiente de arrefecimento depende do calor específico da mercadoria e da condutância térmica para a envolvente. Durante condições de transmissão de calor as condições para a lei de Newton são raramente satisfeitas que ocorrem frequentemente durante situações de pós-colheita, o coeficiente de arrefecimento pode ser calculado através de (Brosnan, 2001)

$$C = \frac{\ln(\theta_1) - \ln(\theta_2)}{t_1 - t_2} \quad (2.38)$$

É possível usar o coeficiente de arrefecimento para determinar quanto tempo demora um processo de arrefecimento, usando através a expressão seguinte:

$$\theta = j * e^{-C*t} \quad (2.39)$$

$$t = -\frac{1}{C} * \ln\left(\frac{\theta}{j}\right) \quad (2.40)$$

Onde  $j$  é o fator de atraso, que pode ser obtido através do prolongamento da porção linear da componente semi-logarítmica da curva de arrefecimento até alcançar e intersecção o eixo de  $\ln(\theta)$ . O fator de atraso,  $j$ , é então uma medida de tempo entre o início do processo de arrefecimento e o instante de tempo onde o declive da recta  $\ln(\theta) \times t$  se torna constante (ou seja, o tempo que demora para a curva de arrefecimento ter comportamento linear). Ao substituímos na expressão anterior a componente  $\theta$  por 0.5, o coeficiente de arrefecimento pode ser relacionado com o Tempo de Meio Arrefecimento,  $Z$  pela expressão seguinte (ASHRAE, 2010):

$$Z = \frac{\ln(2j)}{C} \quad (2.41)$$

## **2.10. Nota conclusiva**

Ao longo deste capítulo definiu-se a importância da gestão da temperatura na fase da pós-colheita, pois esta é um processo essencial para a prevenção e minimização do apodrecimento e desperdício causados pelos processos fisiológicos que ocorrem no interior das frutas e vegetais após a sua colheita. Estes processos fisiológicos estão inerentemente dependentes da temperatura a que os produtos se encontram, e para além de ser necessário realizar a gestão da temperatura também é necessário condicionar o meio envolvente em que estes se encontram, através da regulação da velocidade do ar e/ou humidade relativa, por exemplo, de forma a prevenir a ocorrência de danos (devido a congelamento dos tecidos) ou perda de humidade dos produtos para o meio. Deram-se exemplos de vários tipos de mecanismos de pré-arrefecimento, dando-se maior ênfase aos de arrefecimento a ar e água. Referiu-se por último os métodos de previsão de decaimento de temperatura ao longo do tempo. Primeiramente foi exibida a equação de condução de calor para o caso de condução de calor tridimensional com variação das propriedades. Introduziu-se posteriormente a simplificação para o caso de condução de calor unidimensional para o caso particular de condução de calor em regime transitório em esferas. Exibiu-se o método capacitivo e as condições para o qual este método é aplicável. Por último referiu-se o método de “Fração de temperatura não realizada”, um método simples utilizado na indústria para prever o decaimento da temperatura de F&V.





## 3. Modelação computacional do processo de arrefecimento

### 3.1. Introdução

Descreve-se neste capítulo a utilização da ferramenta computacional utilizada, o COMSOL Multiphysics versão 5.2b. É feita uma abordagem da aplicação do COMSOL para problemas de transmissão de calor, dando-se enfoque ao caso particular de transmissão de calor numa esfera com convecção imposta na sua superfície em regime transitório. Exibe-se a implementação do modelo computacional ao problema de transmissão de calor relativo ao pré-arrefecimento de pêssegos, descrevendo-se as opções consideradas para a criação do modelo. Representam-se também as equações resolvidas pelo COMSOL e malha utilizada. É efetuada a validação do modelo computacional, através da confrontação com resultados experimentais relativos ao arrefecimento de dois lotes de pêssegos em ar e em água.

### 3.2. COMSOL Multiphysics® versão 5.2b

O software COMSOL Multiphysics® é uma ferramenta computacional capaz de resolver modelos baseados em problemas físicos, através da resolução de derivadas parciais (PDE), utilizando o método de elementos finitos (FEM). A sua utilização permite uma fácil implementação de processos físicos clássicos, e utilizando o modo de aplicação, o COMSOL guia o utilizador através de menus pré-definidos com *templates* onde as equações e variáveis estão previamente configuradas para o problema de física escolhido (COMSOL, 2008). Sendo o COMSOL um programa de simulação multifísica, é possível conjugar vários módulos de processos físicos, embutidos no COMSOL, de forma a descrever e simular um processo real complexo. Um exemplo de um fenómeno multifísica seria a conjugação de um problema de CFD em simultâneo com um problema de transmissão de calor. Como o processo de arrefecimento do pêssego se trata de um problema de transmissão de calor, o módulo escolhido e que irá ser descrito de forma mais detalhada no subcapítulo seguinte será o módulo *Heat Transfer*.

### 3.3. Implementação do modelo

Será descrita a adaptação do modelo do COMSOL ao problema do arrefecimento do pêssego, onde se pretende estudar a variação da temperatura do pêssego em dois pontos

distintos (núcleo e superfície). Demonstrar-se-á assim o funcionamento do COMSOL para o caso particular do módulo de transmissão de calor. Serão referidos os procedimentos básicos, e as escolhas feitas passo a passo para a produção do modelo computacional desenvolvido. Irão ser expostas as equações de derivadas parciais que o COMSOL resolve utilizando o método dos elementos finitos, de forma a apresentar a variação da temperatura do modelo computacional ao longo do tempo. Serão descritas as variáveis consideradas, tais como as propriedades térmicas e geométricas do pêssego, a sua temperatura inicial e temperatura de escoamento não perturbado considerada e o coeficiente convectivo adotado.

### 3.3.1. COMSOL Multiphysics® - Model Wizard

Iniciando o COMSOL e escolhendo utilizar o *Model Wizard*, o utilizador é guiado ao longo de três opções para criar uma base para a simulação. Estas opções consistem em definir as dimensões espaciais do problema, como também o tipo de fenómenos físicos envolvidos e as condições do estudo a nível temporal. Iniciando o *Model Wizard* o utilizador depara-se primeiramente com o menu *Select Space Dimension* apresentado na Figura 3.1.

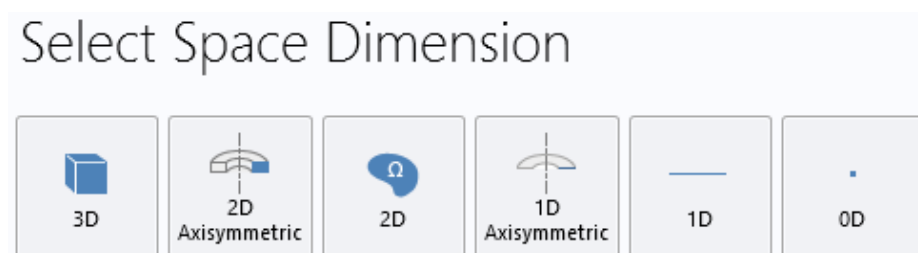


Figura 3.1 - Menu de selecção de dimensão espacial

Este menu permite ao utilizador escolher, de entre zero a três dimensões, a dimensão espacial do problema a resolver. De forma a modelar o pêssego como uma esfera, para posterior simulação, foi seleccionada a opção de três dimensões.

Após a escolha da dimensão espacial, é apresentado o menu *Select Physics*, onde é feita a escolha do módulo de física a aplicar na simulação, com o objetivo de estudar o comportamento físico do objeto. Este menu encontra-se representado na Figura 3.2, onde foi seleccionado o módulo *Heat Transfer*.

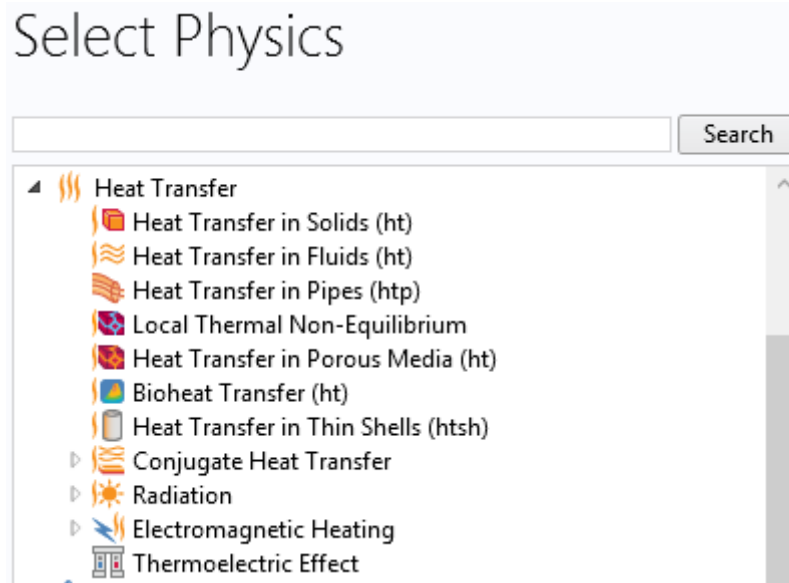


Figura 3.2 - Menu do módulo de Transmissão de Calor

De entre as várias opções de estudo de transmissão de calor presentes no módulo *Heat Transfer*, e tendo em consideração a natureza do problema em questão, foi escolhida a opção *Heat Transfer in Solids*.

O passo final do *Model Wizard* consiste em seleccionar o tipo de estudo a realizar a nível temporal. Representa-se na Figura 3.3 o menu correspondente.

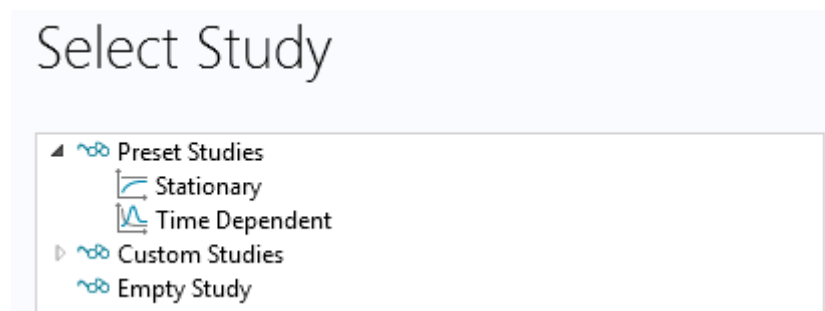


Figura 3.3 - Menu de selecção do tipo de estudo

O COMSOL apresenta dois tipos de estudo para problemas de transmissão de calor em sólidos, regime estacionário e regime transitório. Como se pretende estudar a variação da temperatura no interior do pêssogo ao longo do tempo, foi seleccionada a opção *Time Dependent*.

Concluindo os passos presentes no menu do *Model Wizard* será necessário introduzir no COMSOL as propriedades termofísicas do pêssogo (massa volúmica, condutibilidade térmica, capacidade térmica, e difusividade térmica), definir ou importar uma geometria e dar-lhe as dimensões devidas, e tratando-se de um problema de transmissão de calor

com convecção imposta na superfície em regime transitório, serão necessários dados como temperatura inicial, temperatura de escoamento não perturbado e coeficiente convectivo.

### 3.3.2. Geometria e propriedades termofísicas

De forma a simular o comportamento térmico do pêssigo ao longo do tempo através da utilização do COMSOL, é necessário definir propriedades termofísicas. Estas propriedades são inerentemente dependentes da temperatura a que o pêssigo se encontra. Para a medição da temperatura dos lotes de pêssigo utilizou-se o equipamento digital Testo 435-2, com termopares do tipo T, com uma precisão de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Considerando as gamas de temperaturas a que os lotes 1 e 2 foram sujeitos quando arrefecidos a ar e água, calcularam-se as propriedades do pêssigo para uma temperatura média de  $12^\circ\text{C}$ , tal como se encontra representado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Propriedades obtidas para o material do modelo

Fluido	Lote	Gama de Temperaturas	Temperatura média entre lotes	Propriedades
Ar	Lote 1	$T_i = 20,8^\circ\text{C}$ $T_f = 2,2^\circ\text{C}$	$T_{\text{médio Ar}} = \frac{\left(\frac{T_{i1} + T_{i2}}{2} + \frac{T_{f1} + T_{f2}}{2}\right)}{2}$ $= 12,0^\circ\text{C}$	$k = 0,5510 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$ $\rho = 1105,6 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ $cp = 3868,7 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
	Lote 2	$T_i = 21,4^\circ\text{C}$ $T_f = 3,5^\circ\text{C}$		
Água	Lote 1	$T_i = 20,5^\circ\text{C}$ $T_f = 2,2^\circ\text{C}$	$T_{\text{médio Água}} = \frac{\left(\frac{T_{i1} + T_{i2}}{2} + \frac{T_{f1} + T_{f2}}{2}\right)}{2}$ $= 12,1^\circ\text{C}$	
	Lote 2	$T_i = 23,7^\circ\text{C}$ $T_f = 2,1^\circ\text{C}$		

Analisando a tabela anteriormente representada, verifica-se que a temperatura de  $12^\circ\text{C}$  utilizada para calcular as propriedades térmicas do pêssigo é obtida através da média entre as médias de temperatura inicial e final do pêssigo. Arredondando às unidades, os  $12^\circ\text{C}$  obtêm-se para ambos os arrefecimentos, a ar e a água. As propriedades obtidas são aplicáveis a ambos os ensaios, a ar e a água. Os cálculos realizados para a obtenção das propriedades exibem-se em detalhe no Anexo A.

Para além das propriedades componente térmica dos pêssigos e sistema de arrefecimento, é também necessário conhecer as propriedades geométricas do pêssigo, por forma a criar

um modelo físico no COMSOL que represente fidedignamente o comportamento térmico deste ao longo do tempo. Conhecendo o peso médio de cada lote e a massa volúmica de cada pêsego (representada na Tabela 3.1), calcula-se o raio médio representativo de um pêsego correspondente a cada lote. De notar que os cálculos foram realizados de forma a aproximar o formato do pêsego ao de uma esfera.

Tabela 3.2- Comparação das propriedades geométricas entre lotes

Propriedades	Lote 1	Lote 2
Peso [kg]	$160,0 * 10^{-3}$	$151,0 * 10^{-3}$
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	$1,1056 * 10^3$	$1,1056 * 10^3$
Volume [m <sup>3</sup> ]	$144,7 * 10^{-6}$	$136,7 * 10^{-6}$
Raio [m]	$32,6 * 10^{-3}$	$32,0 * 10^{-3}$

Tendo-se obtido um raio de 32,6 mm para os pêsegos do Lote 1, e um raio de 32,0 mm para os pêsegos do Lote 2, considerou-se uma única esfera representativa (para ambos os modelos produzidos para arrefecimento a ar e a água) com um raio de 32,3 mm.

### 3.3.3. COMSOL Multiphysics® - Model Builder

Assim que o utilizador conclui os passos referidos no *Model Wizard*, é apresentado o *Model Builder*, onde estão presentes os sub-menus restantes de forma a realizar a completa caracterização do processo de arrefecimento. Representa-se na Figura 3.4 os submenus correspondentes ao *Model Builder* e o módulo de Transmissão de Calor em Sólidos.

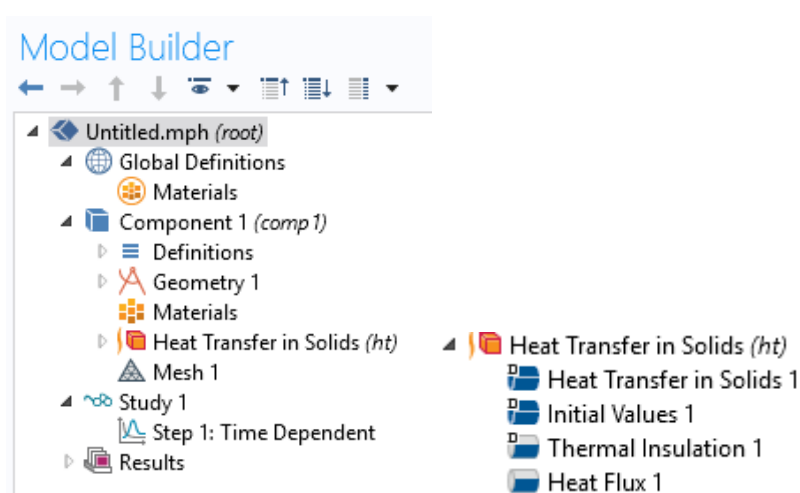


Figura 3.4 - Model Builder e Transmissão de Calor em Sólidos

### 3.3.4. Parametrização

A parametrização do problema de arrefecimento é feita a partir do *Model Builder*. Nos seguintes subcapítulos irão ser explicitadas as escolhas feitas a nível da geometria do modelo, materiais considerados (propriedades físicas), condições de fluxo de calor (propriedades térmicas), equações resolvidas pelo COMSOL, propriedades da malha computacional, propriedades do estudo de transmissão de calor em regime transitório, análise e processamento de dados, e configuração do COMSOL para realizar estudos paramétricos.

#### 3.3.4.1. Geometria

Tendo-se recorrido ao submenu com o nome pré-definido pelo COMSOL como *Geometry 1*, foi criada uma esfera sólida de raio de 32,3 mm, tal como se encontra representado na Figura 3.5.

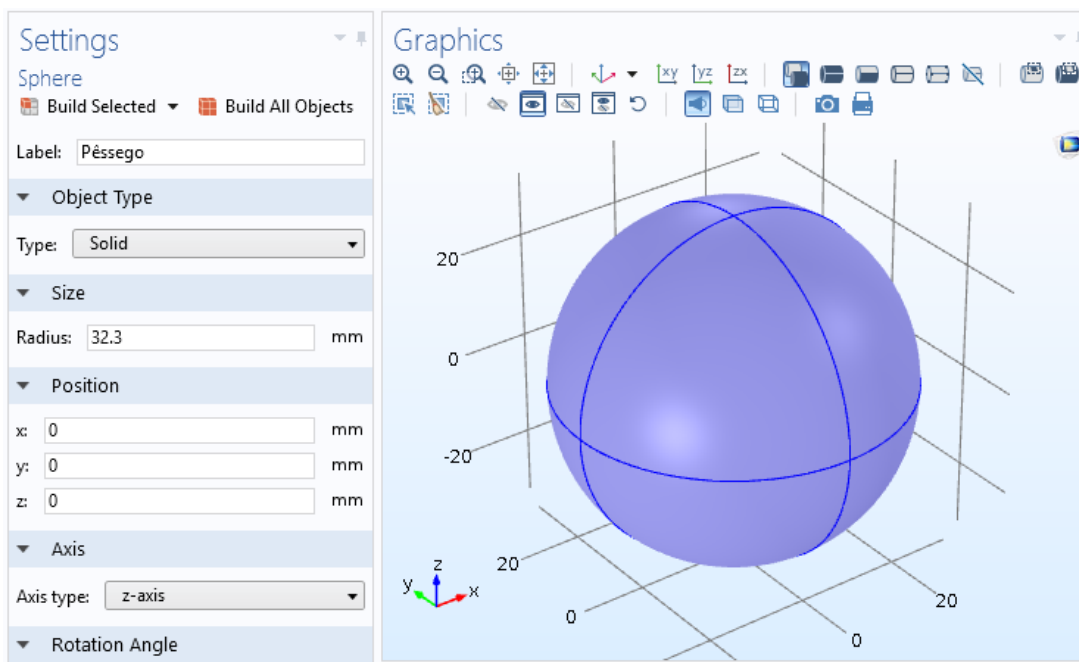


Figura 3.5 - Parametrização da geometria esférica

Considerou-se para a criação e representação do pêssigo uma esfera sólida e geometricamente uniforme, não sendo feita distinção entre a superfície, interior e núcleo do pêssigo.

#### 3.3.4.2. Material

Como o pêssigo não consta na lista de materiais presentes e pré-definidos no COMSOL, este foi adicionado ao COMSOL, inserindo um novo material através do *Blank Material*.

Neste menu podem-se definir as propriedades físicas do material presente no modelo numérico, tal como representado na Figura 3.6.

Material Contents					
Property	Name	Value	Unit	Property group	
Diffusion coefficient	D	1.3494*10^-7	m <sup>2</sup> /s	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k	0.5510	W/(m·K)	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	1105.6	kg/m <sup>3</sup>	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	3868.7	J/(kg·K)	Basic	

Figura 3.6 - Propriedades físicas do modelo numérico

As propriedades configuradas no COMSOL correspondem aquelas referidas previamente na Tabela 3.1.

### 3.3.4.3. Heat Transfer in Solids - Transmissão de Calor em Sólidos

Na componente *Heat Transfer in Solids* é exposta a equação de calor resolvida numericamente pelo COMSOL, e as propriedades físicas anteriormente definidas, como é possível ver na Figura 3.7.

Equation

Show equation assuming:  
Study 1, Time Dependent

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{ted}$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

Model Inputs

Coordinate System Selection

Coordinate system:  
Global coordinate system

Heat Conduction, Solid

Thermal conductivity:  
k From material

Thermodynamics, Solid

Density:  
 $\rho$  From material

Heat capacity at constant pressure:  
 $C_p$  From material

Figura 3.7 - Propriedades do material referidas no sub-menu *Heat Transfer in Solids*

Tendo-se selecionado no *Model Wizard* um problema de transmissão de calor em sólidos em regime transitório, o COMSOL automaticamente prepara o modelo para problemas de transmissão de calor. A equação de calor que é resolvida pelo COMSOL é a seguinte (COMSOL, 2012):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \nabla T + \nabla \mathbf{q} = Q + Q_{\text{ted}} \quad (3.1)$$

Onde

- T é a temperatura absoluta [K]
- u é o vetor de velocidade [m/s]
- q é o vetor de fluxo de calor por condução (W/m<sup>2</sup>), com  $\mathbf{q} = -k \nabla T$
- Q é o termo fonte de calor.
- $Q_{\text{ted}}$  é o amortecimento termoelástico (contabiliza o efeito termoelástico em sólidos, utilizado no módulo *Structural Mechanics* em análise de vibrações).

Se o a velocidade for nula e se desprezar o amortecimento termoelástico, a equação que o COMSOL irá resolver resulta em:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T) = Q \quad (3.2)$$

#### 3.3.4.4. Valor de temperatura inicial

Neste submenu, que se encontra representado na Figura 3.4, denominado de *Initial Values*, indica-se qual o valor inicial de temperatura em valor absoluto a que o modelo se vai encontrar. Foi utilizado o valor de 294,3 K para o ensaio de arrefecimento a ar, e 295,3 K para o arrefecimento a água.

#### 3.3.4.5. Fluxo de calor imposto na fronteira

A equação de calor aceita dois tipos básicos de condições de fronteira: temperatura imposta, e fluxo de calor imposto. Para a produção deste modelo considerou-se fluxo de calor imposto, representado por:

$$-\mathbf{n} \mathbf{q} = q_o \quad (3.3)$$

Onde

- $\mathbf{q}$  é o vetor de fluxo de calor por condução ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), com  $\mathbf{q} = -k\nabla T$
- $\mathbf{n}$  é a normal do vetor da fronteira
- $q_o$  é fluxo de calor imposto [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], normal à fronteira.

Para a situação de convecção imposta o fluxo de calor é dado por

$$q_o = h(T_\infty - T) \quad (3.4)$$

Onde  $T_\infty$  é a temperatura de escoamento não perturbado, e  $h$  é o coeficiente convectivo, representando o efeito de um fluido exterior a arrefecer ou aquecer a superfície de um sólido (COMSOL, 2012). Este submenu encontra-se representado na Figura 3.8

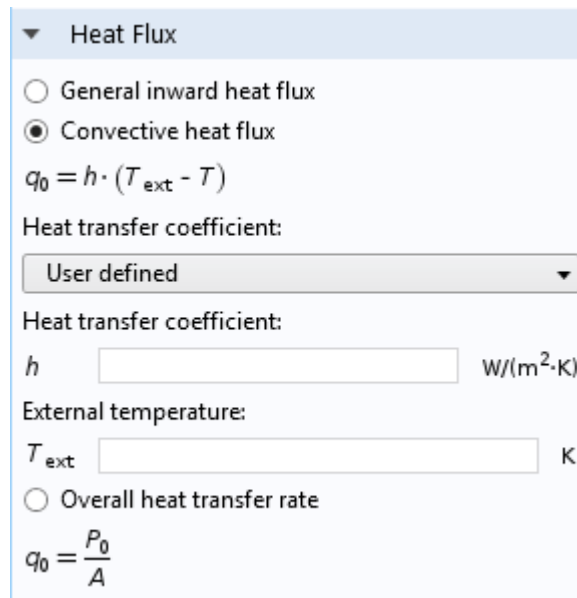


Figura 3.8 - Definição do fluxo de calor imposto na fronteira

O utilizador pode escolher de entre 3 tipos de fluxo imposto na fronteira (*General inward heat flux*; *Convective heat flux*; *Overall heat transfer rate*). Dada a natureza do problema foi escolhido fluxo de calor por convecção imposto. Nesta opção define-se o coeficiente convectivo,  $h$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ], e a temperatura absoluta de escoamento não perturbado [ $\text{K}$ ]. Definiu-se uma temperatura absoluta de escoamento não perturbado de 274,7 K para o arrefecimento a ar, e de 275 K para o arrefecimento a água.

#### 3.3.4.6. Coeficiente Convectivo

O submenu apresentado anteriormente (*Heat Flux*) permite ao utilizador definir um coeficiente convectivo à sua escolha ou utilizar o COMSOL para calcular um coeficiente convectivo a partir de dados como o tipo de escoamento (natural ou forçado, interno ou externo), diâmetro e/ou comprimento, velocidade de escoamento, entre outros. O COMSOL, a partir dos dados e correlações integradas, calcula um coeficiente convectivo e aplica-o ao problema em questão. De forma a utilizar as capacidades do COMSOL para calcular um coeficiente convectivo, tornar-se-ia necessário expandir o modelo computacional para além de uma esfera, sendo também indispensável criar um modelo que descrevesse o escoamento e o processo de transmissão de calor do fluido de arrefecimento. Isto iria fazer com que as simulações se tornassem complexas, tornando o processo moroso, mais laborioso a nível computacional. A principal adversidade aquando da utilização de um coeficiente convectivo reside ou no seu cálculo ou no próprio valor de  $h$  considerado. O valor de  $h$  é dependente do fluido de arrefecimento e suas propriedades, da temperatura da superfície do sólido, do tipo de convecção (natural ou forçada), e da configuração geométrica presente.

Serão expostos no sub-capítulo 3.3.4.7 e 3.3.4.8 os coeficientes convectivos considerados, e no sub-capítulo 3.4 (Validação do modelo experimental), os coeficientes convectivos adotados.

#### 3.3.4.7. Coeficiente Convectivo - Arrefecimento a Ar

Para cada tipo de arrefecimento (ar e água), selecionou-se um coeficiente convectivo com base em correlações empíricas para situações semelhantes à da configuração do processo de arrefecimento presentes no ensaio experimental. De forma a selecionar um coeficiente convectivo, foi feita uma análise à literatura existente, com casos semelhantes ao exposto neste trabalho. Fikiin *et al.* (1999) determinaram o valor do coeficiente convectivo para arrefecimento de vários tipos de fruta empacotada numa situação equivalente de arrefecimento numa câmara-de-ar (dentre elas também caixas de pêsego expostas a escoamento forçado de ar). A correlação utilizada para obter valores de coeficiente convectivo para um empacotamento de pêsegos é a seguinte:

$$h_{pl}(w) = C_1 * \exp(C_2 * w) + C_3 \quad (3.5)$$

Com:

- $C_1 = -15.94$
- $C_2 = -0.11$

- $C_3 = 18.72$
- $w$  corresponde à velocidade de escoamento e toma valores entre 1 e 10 m/s

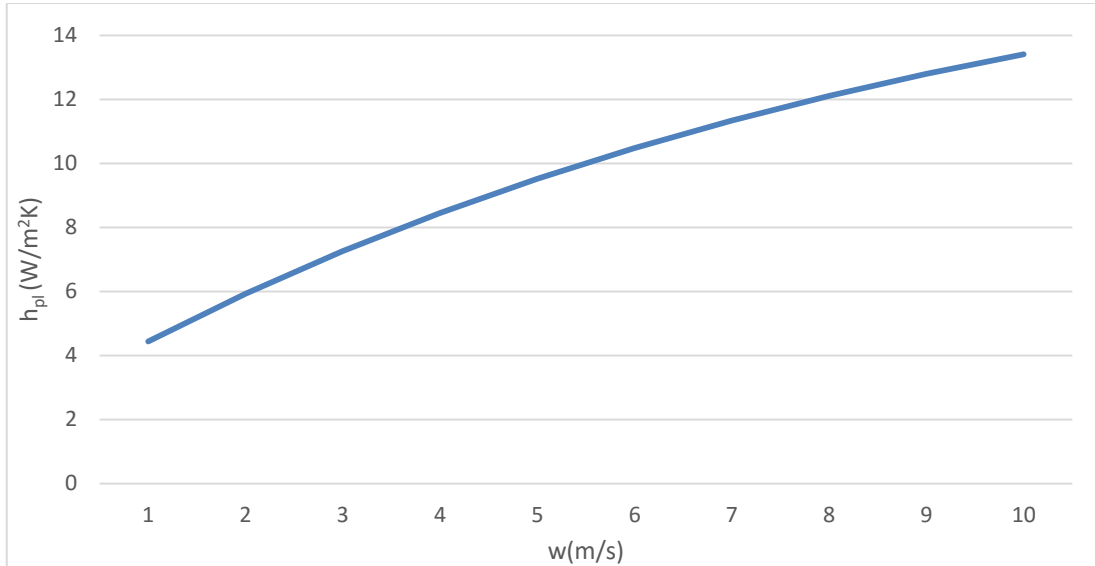


Figura 3.9 - Variação do coeficiente convectivo em função da velocidade de escoamento

Para um empacotamento de pêssegos submetido ao arrefecimento forçado a ar, os dados de coeficiente convectivo apresentados variam com a velocidade do escoamento, numa gama de valores entre 4 e 12 W/m<sup>2</sup>K, para uma gama de velocidades entre 1 e 10 m/s. Para câmaras de arrefecimento semelhantes às utilizadas experimentalmente. São referidos os valores de 1.5 e 2 m/s (ASHRAE, 2010), a que correspondem valores de coeficiente convectivo de 5.2 e 6 W/m<sup>2</sup>K, respetivamente.

#### 3.3.4.8. Coeficiente Convectivo - Arrefecimento a água

No trabalho de Dincer *et al.* (1991) foram determinados valores de coeficiente convectivo para produtos hortofrutícolas esféricos através do uso de escoamento de água. Neste estudo foram usados peras e tomates. A pera é um fruto que apresenta propriedades termofísicas semelhantes às do pêssego, com  $k = 0.55719$  W/mK e  $\alpha = 1.37810^{-7}$  m<sup>2</sup>/s.

As temperaturas da água utilizadas no trabalho de Dincer *et al.* (1991) foram de 0.8, 1.0 e 1.2 °C, obtendo-se uma gama de valores de coeficiente convectivo entre 206.07 e 1839.92 W/m<sup>2</sup>K, para 1.2 °C no caso de arrefecimento de peras. Também no trabalho de Dincer (1991) esta gama de valores foi comparada com a correlação convectiva semi teórica de Vliet e Leppert (Dincer, 1991), onde para uma temperatura de 1.2 °C obteve-se uma gama de valores de coeficiente convectivo entre 628.76 e 725.37 W/m<sup>2</sup>K. Também Çengel (2002) refere um valor de 680 W/m<sup>2</sup>K como valor característico para o arrefecimento a água em

condições ótimas. Desta forma, para o caso de arrefecimento a água, consideraram-se valores de coeficiente convectivo desde os 200 aos 2000 W/m<sup>2</sup>K.

#### **3.3.4.9. Configuração da malha computacional**

Definido o tipo de geometria a utilizar, o tipo de material a aplicar ao modelo e as suas propriedades, como também o tipo de problema de transmissão de calor (condução de calor num sólido com convecção imposta na superfície), é necessário definir a malha do modelo computacional. O COMSOL para problemas tridimensionais aplica por defeito elementos tetraédricos à geometria definida, pois através do uso de formas tetraédricas torna-se possível modelar qualquer tipo de geometria.

A escolha correta do tipo de malha computacional é uma componente essencial do processo de simulação, pois permite estabelecer um compromisso entre precisão de resultados e tempo de cálculo. O COMSOL possui 9 tipos diferentes de parâmetros relativos ao tamanho dos elementos da malha computacional (variando entre *Extremely Coarse* e *Extremely Fine*). Representa-se na Figura 3.10 o menu correspondente à criação da malha computacional e escolha do tamanho dos elementos constituintes da malha.

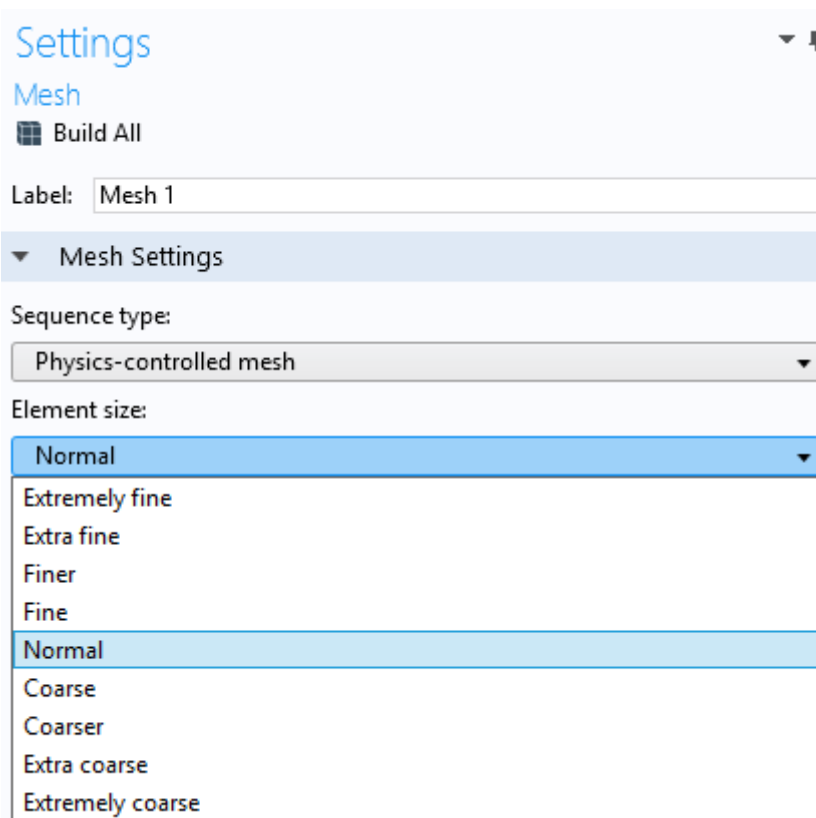


Figura 3.10 - Definições do tipo de malha e configuração do tamanho dos elementos

Escolhendo o tipo de sequência de *Physics-controlled mesh* o COMSOL cria e adapta a malha computacional da forma mais indicada para o modelo *Heat Transfer in Solids*.

Na Figura 3.11 comparam-se três tipos de malhas computacionais, onde se confrontam dados como o número de elementos e qualidade mínima e média de cada elemento.

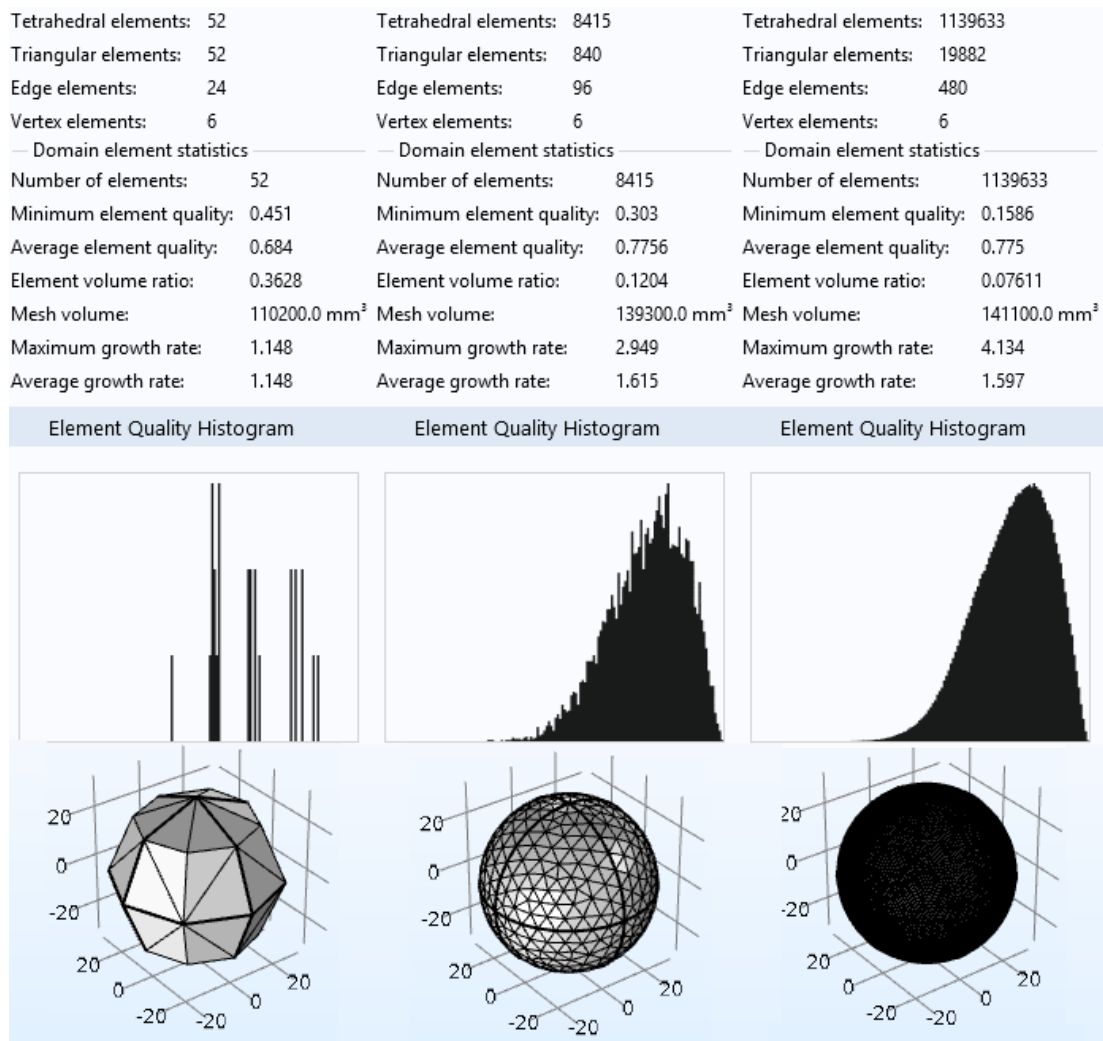


Figura 3.11- Comparação entre três tipos de malhas computacionais, *Extremely Coarse*, *Normal* e *Extremely Fine*

O COMSOL fornece estatísticas para cada tipo de tamanho de elemento computacional. Realçam-se os seguintes critérios:

- *Number of elements* - dita o número de elementos pelo qual a malha é constituída;
- *Minimum element quality* - varia entre 0 e 1, quanto maior for este número maior é a qualidade mínima de cada elemento, estatisticamente;
- *Average elemento quality* - varia entre 0 e 1, quanto maior for este número maior é a qualidade média de cada elemento, estatisticamente;

- *Histogram quality element* - histograma onde o eixo dos x representa a qualidade do elemento (entre 0 e 1), e o eixo dos y indica o número de elementos com qualidade semelhante.

Embora o modelo *Extremely Coarse* apresente a maior qualidade mínima dos três modelos considerados (0,451), apresenta poucas entradas no *Element Quality Histogram*, e possui só 52 elementos tetraédricos. O modelo *Normal* possui um número de elementos muito superior ao que é verificável no modelo *Extremely Coarse* (8415), mesmo apresentando uma menor qualidade mínima, a qualidade média dos elementos é superior, havendo uma maior amostragem de elementos (0,7756). O modelo *Extremely Fine* apresenta o maior número de elementos (1139633), mas a menor qualidade mínima de elementos (0,1586) e uma qualidade média inferior ao modelo *Normal* (0,775), mas o histograma com mais entradas. Assim é expectável a obtenção de bons resultados na simulação (com uma boa resolução dos elementos e qualidade dos mesmos) sem a necessidade de utilizar recursos computacionais em excesso (COMSOL, 2015).

#### 3.3.4.10. Configuração do tipo de estudo

No *Model Wizard* definiu-se o tipo de estudo como transmissão de calor em regime transitório. No submenu *Study1* o utilizador tem à disposição as configurações presentes na Figura 3.12.

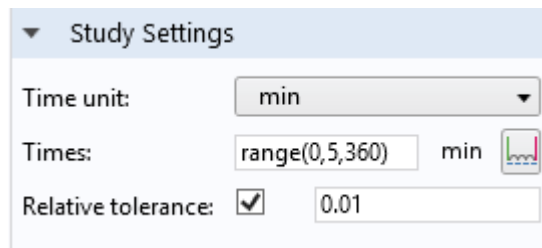


Figura 3.12 - Parametrização do menu *Study Settings*

No sub-menu *Time unit* seleciona-se a unidade temporal do problema. O registo da temperatura para o caso do arrefecimento a ar foi feito durante 360 minutos, de 5 em 5 minutos, e o registo da temperatura para o caso do arrefecimento a água foi feito durante 50 minutos, de 1 em 1 minuto. Tendo isto em consideração, a gama de valores inserida no sub-menu *Times*, foi de 0 a 50 minutos com um step de 1 minuto para o caso de arrefecimento a água, e de 0 a 360 minutos com um step de 5 minuto para o caso de arrefecimento a ar. A tolerância relativa é configurada automaticamente para 0.01, ou seja, para um erro relativo inferior a 1%. Assim, o COMSOL irá registar a variação da temperatura a cada *Time Step*.

### 3.3.4.11. Registo da variação da temperatura no modelo

O passo final reside em configurar o COMSOL para registar a variação da temperatura em pontos específicos e exportar os resultados para posterior tratamento de dados. A variação da temperatura experimental foi registada no núcleo dos pêssegos, para ambos os arrefecimentos, a ar e a água. Recorrendo ao submenu *Results*, o utilizador depara-se com a componente *Data Sets* e *Derived Values*, como se observa na Figura 3.13.

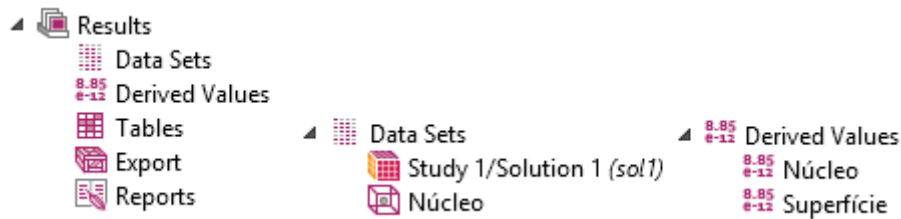


Figura 3.13 - Componente *Results* e sub-menus *Data Sets* e *Derived Values*

Na componente *Data Sets* são armazenados os dados referentes à variação da temperatura. Considerando 1 cm a partir do centro geométrico do modelo esférico, configurou-se no COMSOL no separador *Results* um *Cut Point 3D*, dando-lhe o nome de “Núcleo”, como é possível observar na Figura 3.14.

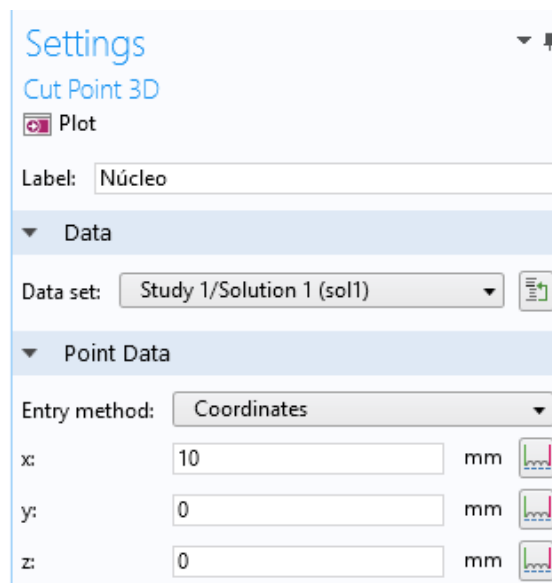


Figura 3.14 - Registo das coordenadas do ponto de medição

Parametrizando distância de 10 mm no eixo x e selecionando o botão *Plot*, obtém-se a confirmação visual da implementação do ponto de medição no modelo, como se verifica na Figura 3.15.

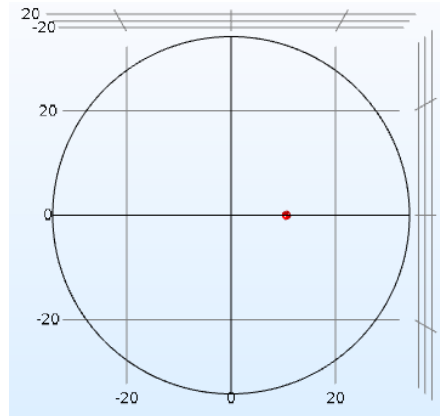


Figura 3.15 - Implementação do ponto de medição no COMSOL

Este será o ponto onde vai ser realizado o registo da variação da temperatura a 10 mm do centro geométrico do modelo de forma a contabilizar a existência de caroço. Os dados de variação da temperatura no Núcleo serão registados no *Data Set* referente ao Núcleo. Neste submenu indica-se qual o ponto no qual se deve registar a variação de grandezas. Definiu-se a temperatura em graus Celsius, conforme é possível visualizar na Figura 3.16.

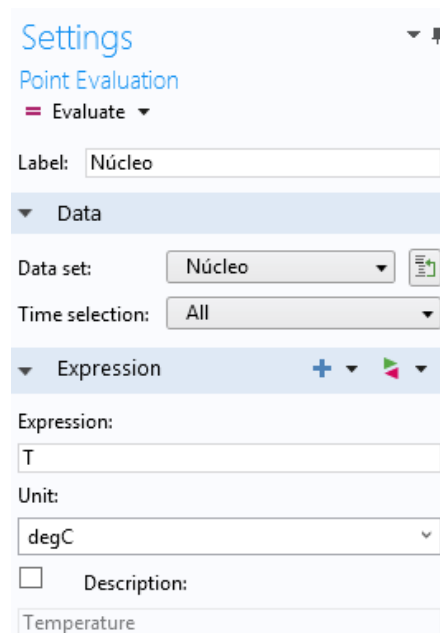


Figura 3.16 - Configurações relativas ao *Point Evaluation* do núcleo

Para a componente de validação experimental foram somente confrontados os resultados referentes à variação da temperatura no núcleo do pêssago, medida experimentalmente, com os resultados obtidos para a variação da temperatura medida no núcleo através do modelo computacional. No capítulo 4, referente ao estudo de casos, também foi registada a variação da temperatura na superfície do modelo computacional.

Na Figura 3.17 representa-se a configuração do ponto de registo da variação da temperatura na superfície do modelo computacional e o registo da variação da temperatura em graus Celsius.

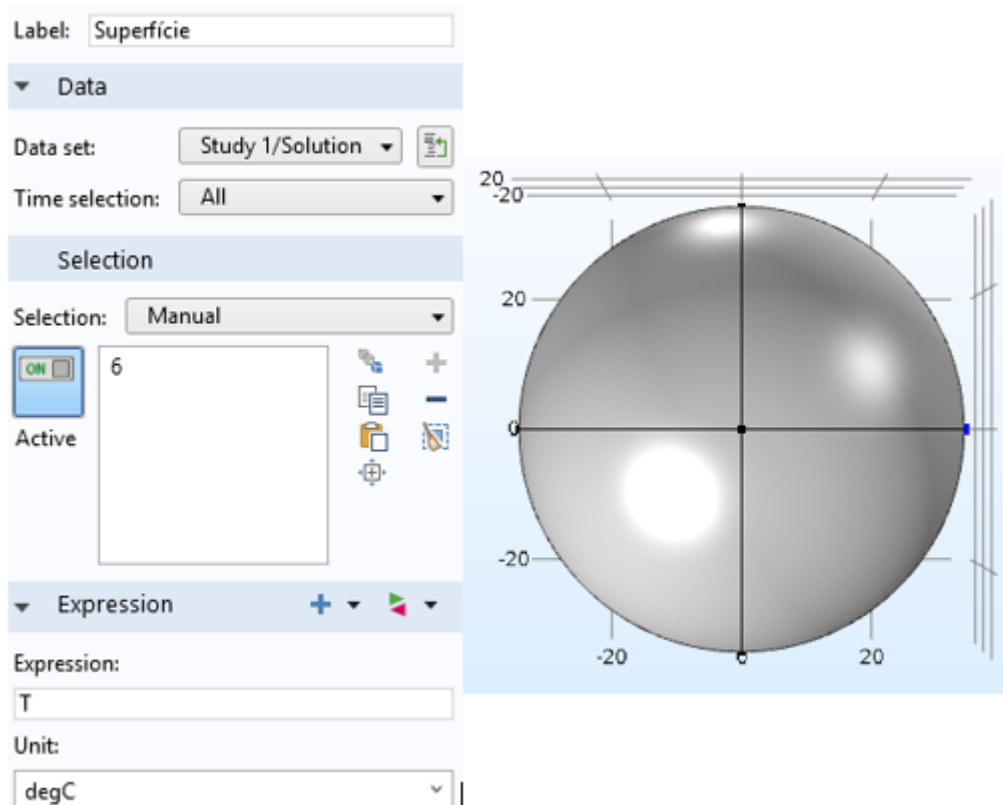


Figura 3.17 - Configuração do *Point Evaluation* e ponto de medição da superfície

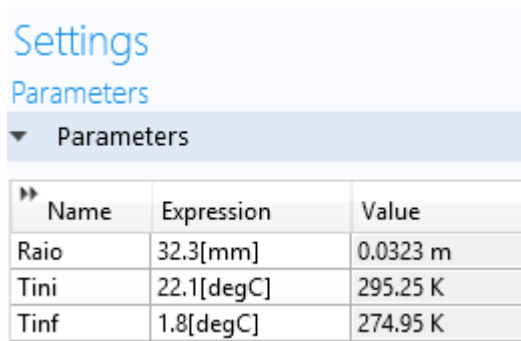
#### 3.3.4.12. Processamento dos resultados

Selecionando a opção *Evaluate* visível na Figura 3.16, o COMSOL irá produzir uma tabela com duas colunas. Numa coluna encontra-se a variação do tempo em minutos (de acordo com o *Step* definido conforme representado na Figura 3.12) e a temperatura do ponto escolhido em graus Celsius, para cada instante de tempo indicado na primeira coluna. Estes resultados podem ser copiados diretamente para o Excel para posterior tratamento de dados e criação de tabelas e gráficos.

#### 3.3.4.13. Configuração de estudo paramétrico

O COMSOL permite a realização de estudos paramétricos. Esta funcionalidade será utilizada no Capítulo 4, onde é feito o estudo da variação do diâmetro, temperatura inicial e temperatura de escoamento não perturbado do modelo desenvolvido (para ambos os casos de arrefecimento a ar e a água). Para tal é necessário configurar uma tabela com variáveis. Esta tabela, denominada de *Parameters*, é adicionada no submenu *Global Definitions*, representado na Figura 3.4. Nessa tabela configuraram-se as variáveis

representadas na Figura 3.18 (raio, temperatura inicial, e temperatura de escoamento não perturbado).



Name	Expression	Value
Raio	32.3[mm]	0.0323 m
Tini	22.1[degC]	295.25 K
Tinf	1.8[degC]	274.95 K

Figura 3.18 - Inserção de parâmetros no menu *Parameters*

Estas variáveis são inseridas nas caixas de texto dos submenus correspondentes. Indica-se na Figura 3.19 a inserção das variáveis Raio, Tini e Tinf.

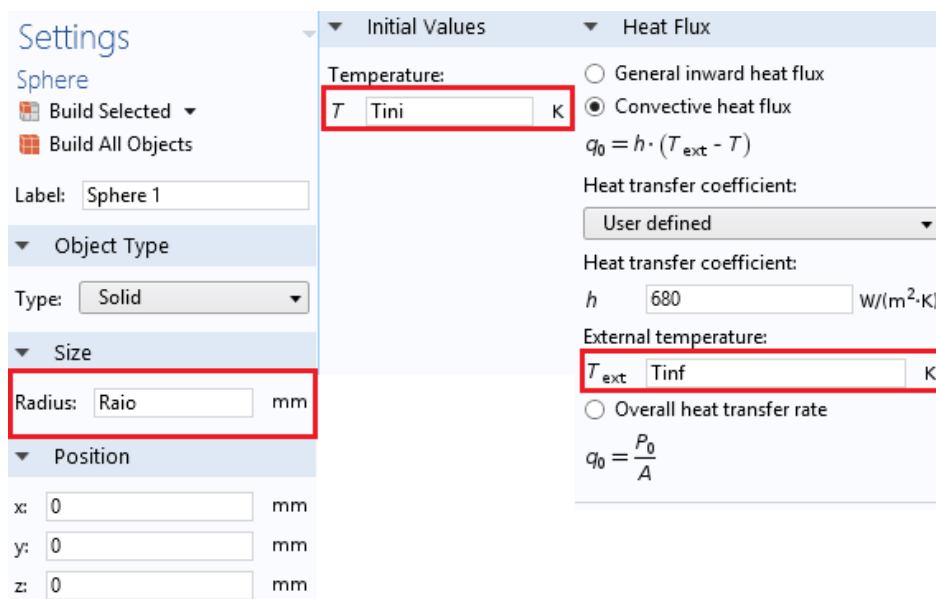


Figura 3.19 - Parametrização utilizando variáveis

No submenu *Study1* representado na Figura 3.4, é adicionado o *Parametric Sweep*. Neste submenu é possível definir combinações de variáveis. O utilizador é capaz de fazer um varrimento de parâmetros para uma só variável, ou combinar duas ou mais variáveis. Quantas mais variáveis forem combinadas, mais exigente se tornará o modelo a nível computacional. Exemplifica-se na Figura 3.20 a configuração do *Parametric Sweep* para o caso particular do estudo da variação do diâmetro do modelo computacional, onde é variado o raio do modelo desde os 25.5 aos 50 mm, em intervalos de 0,5 mm. É também

possível observar a possibilidade em variar as variáveis “Tini” e “Tinf”, sendo necessário variar o intervalo e *step* da simulação, e as unidades da variável.

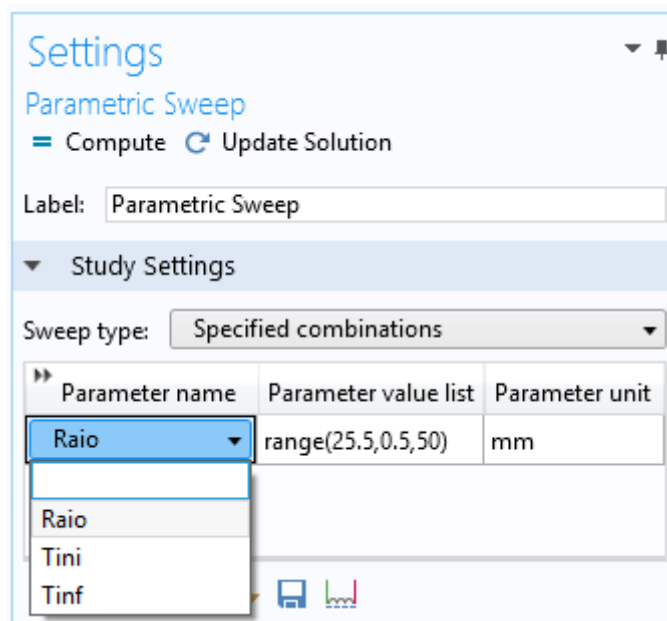


Figura 3.20 - Parametrização do menu *Parametric Sweep*

### 3.4. Validação do modelo

Neste presente subcapítulo irá ser explicitada a validação do modelo computacional desenvolvido no COMSOL. Exibir-se-ão os resultados obtidos experimentalmente para o arrefecimento a ar e a água, apresentando-se os valores registados para a variação da temperatura na sua forma adimensional ao longo do tempo. Posteriormente, apresentar-se-á a variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, dando-se ênfase aos parâmetros de Tempo de Meio Arrefecimento e *Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento de Arrefecimento*. Para a validação experimental escolheu-se o modelo *Normal* devido a apresentar uma boa relação entre número de elementos e a qualidade destes. Estes dois valores de instante de tempo irão servir como meio de comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados provenientes da simulação realizada no COMSOL.

#### 3.4.1. Experimental

Para a obtenção dos dados experimentais foram considerados dois tipos de processo de arrefecimento. O primeiro processo de arrefecimento considerado foi o de arrefecimento a ar, por meio de uma câmara de arrefecimento. No segundo processo de arrefecimento foi utilizado um *hidrocooler* do tipo chuva. Em ambos os processos de arrefecimento foram considerados dois lotes de pêsego vermelho, perfazendo um total de estudo de quatro

lotes (2 para o arrefecimento a ar, e dois para o arrefecimento a água). Para medição da temperatura utilizou-se o equipamento digital Testo 435-2, com termopares do tipo T, com uma precisão de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . A temperatura foi registada no núcleo do pêssego, de 5 em 5 minutos para o caso de arrefecimento a ar (durante 360 minutos) e de 1 em 1 minuto para o caso de arrefecimento a água (durante 50 minutos). O peso médio de cada lote 1 e 2 encontra-se representado na Tabela 3.2.

#### 3.4.1.1. Arrefecimento a ar

Representa-se na Tabela 3.3 os parâmetros registados para o ensaio de arrefecimento a ar. Exibe-se o tempo de permanência de cada lote no sistema de arrefecimento e a temperatura do sistema de arrefecimento. São também explicitadas as temperaturas de entrada e de saída de cada lote de pêssegos.

Tabela 3.3 - Parâmetros relativos ao ensaio de arrefecimento a ar

Parâmetros	Arrefecimento a ar	
	Lote 1 - Pêssego vermelho	Lote 2 - Pêssego vermelho
Tempo de permanência no sistema de arrefecimento	6h	6h:40
Temperatura do sistema de arrefecimento	0 - $2,1^{\circ}\text{C}$	1 - $3^{\circ}\text{C}$
Temperatura do interior da fruta, entrada	$20,8^{\circ}\text{C}$	$21,4^{\circ}\text{C}$
Temperatura do interior da fruta, saída	$2,2 \pm 1^{\circ}\text{C}$	$2,6^{\circ}\text{C}$

Na Figura 3.21 representa-se a variação da temperatura na sua forma adimensional ao longo do tempo, para uma duração de 360 minutos. A variação da temperatura adimensional é referente aos lotes 1 e 2, quando arrefecidos na câmara de arrefecimento.

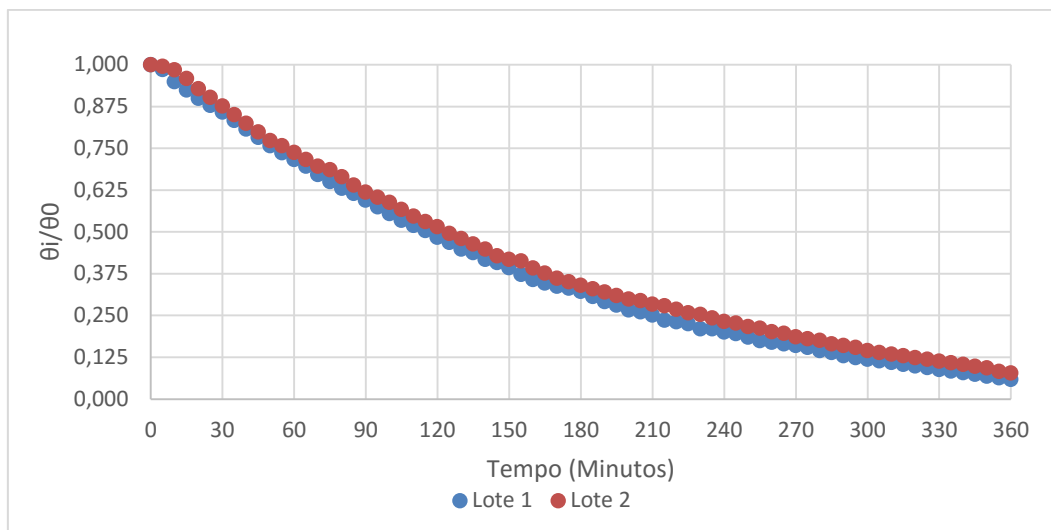


Figura 3.21 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, arrefecimento a ar

O Tempo de Meio Arrefecimento relativo ao lote 1 e ao lote 2 é de 115 minutos e 125 minutos, respetivamente. Verifica-se assim uma diferença de 10 minutos entre o  $t_{1/2}$  de ambos os lotes. O instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento ocorre aos 295 minutos para o lote 1, e aos 320 minutos para o lote 2, verificando-se uma diferença de 25 minutos entre o  $t_{7/8}$  de ambos os lotes.

### 3.4.1.2. Arrefecimento a água

Na Tabela 3.4 exibem-se os parâmetros correspondentes ao ensaio de arrefecimento a água. Menciona-se o tempo de permanência de cada lote de pêssego no sistema de arrefecimento, e a temperatura da água do sistema de arrefecimento usada em cada lote. Exibe-se também a temperatura no interior da fruta aquando a sua entrada e saída no sistema de arrefecimento.

Tabela 3.4 - Parâmetros relativos ao ensaio de arrefecimento a água

Parâmetros	Arrefecimento a água	
	Lote 1 - Pêssego vermelho	Lote 2 - Pêssego vermelho
Tempo de permanência no sistema de arrefecimento	51 min	54 min
Temperatura do sistema de arrefecimento	2°C	1,6°C
Temperatura do interior da fruta, entrada	20,5°C	23,7°C
Temperatura do interior da fruta, saída	2,2°C	2,0°C

Na Figura 3.22 representa-se a variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, no núcleo do pêssigo para o caso de arrefecimento a água. Exibem-se os resultados para um ensaio com duração de 50 minutos.

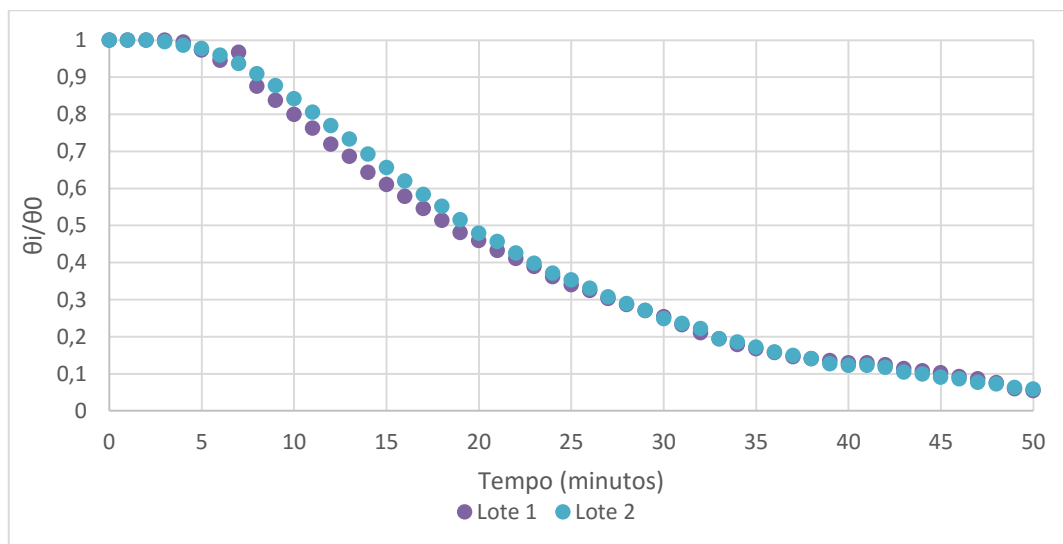


Figura 3.22 - Variação da temperatura adimensional, arrefecimento a água

O Tempo de Meio Arrefecimento relativo ao lote 1 e ao lote 2 é de 18 minutos e 19 minutos, respetivamente. Verifica-se assim uma diferença de 1 minuto entre o  $t_{1/2}$  de ambos os lotes. O instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento ocorre aos 42 minutos para o lote 1, e aos 39 minutos para o lote 2, verificando-se uma diferença de 3 minutos entre o  $t_{7/8}$  de ambos os lotes.

### 3.4.2. Validação do modelo numérico - Arrefecimento a ar

Considerou-se uma única esfera representativa dos dois lotes, com um raio médio de 32,3 mm, uma temperatura inicial média de 294,3 K e temperatura de escoamento não perturbado média de 274,7 K. As propriedades físicas do pêssigo, dependentes da temperatura são as referidas na Tabela 3.1. Assim, o modelo numérico para o arrefecimento a ar deverá representar a resposta térmica de um lote intermédio entre o lote 1 e 2 de pêssigo. Foi selecionada uma malha do tipo normal, conforme referido em 3.3.4.9. A simulação foi realizada para um estudo de 360 minutos, com um passo de 5 minutos, com uma tolerância relativa de 0,01, tal como foi exposto em 3.3.4.10. A variação da temperatura do modelo computacional foi registada a 1cm do centro geométrico da esfera, de forma a contabilizar a existência do núcleo, fazendo assim uma aproximação de uma comparação física com o que foi realizado para o registo da temperatura no ensaio experimental. O coeficiente convectivo adotado para a validação foi o de 6 W/m<sup>2</sup>K, pois é este valor que permite uma maior aproximação dos resultados obtidos pelo COMSOL aos resultados experimentais, tal como foi referido em 3.3.4.7. Para

a validação do modelo numérico foram considerados e configurados no COMSOL os parâmetros exibidos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Parâmetros relativos à simulação de arrefecimento a ar

Parâmetros	Valor
Raio	32,3 [mm]
Massa volúmica, $\rho$	1105,6 [kg/m <sup>3</sup> ]
Condutibilidade Térmica, $k$	0,5510 [W/(m*K)]
Calor específico	3868,7 [J/(kg*K)]
Temperatura inicial	294,3 [K]
Temperatura de escoamento não perturbado	274,7 [K]
Coeficiente convectivo	6 [W/m <sup>2</sup> *K]
Duração do estudo	360 [min]

Na Figura 3.23 encontra-se representada a variação da temperatura, no núcleo, na sua forma adimensional do lote 1, lote 2, e do modelo criado no COMSOL com o objetivo de representar a resposta térmica de um lote intermédio entre os lotes experimentais.

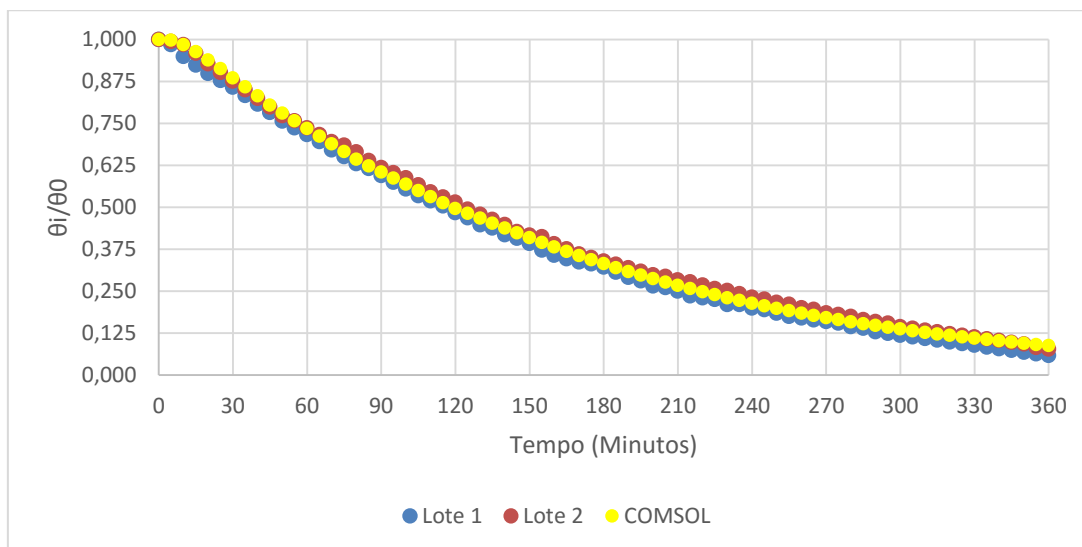


Figura 3.23 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o lote 1, lote 2 e modelo computacional, núcleo, arrefecimento a ar

Como é possível observar, o comportamento da curva de arrefecimento de ambos os lotes e do modelo seguem uma tendência exponencial. O modelo apresenta um ligeiro atraso em comparação a ambos os lotes até sensivelmente a primeira hora de ensaio. Posteriormente ao decorrer da primeira hora, a curva de arrefecimento do modelo apresenta uma variação que se aparenta estar enquadrada entre as curvas de arrefecimento do lote 1 e lote 2. O

$t_{1/2}$  para a curva de arrefecimento proveniente do COMSOL é de 120 minutos e o  $t_{7/8}$  ocorre aos 310 minutos. O Tempo de Meio Arrefecimento médio entre o lote 1 e 2 é de 120 minutos, não havendo diferença para o Tempo de Meio Arrefecimento obtido pelo COMSOL. O Tempo de Sete Oitavos médio entre o lote 1 e 2 é de 307,5 minutos, havendo uma diferença de 0,8% para o Tempo de Sete Oitavos obtido pelo COMSOL. Verifica-se assim que o modelo produzido no COMSOL é capaz de uma boa representação do comportamento térmico dos pêssegos verificado experimentalmente, para o caso de arrefecimento a ar.

### 3.4.3. Validação do modelo numérico - Arrefecimento a água

Para a validação do modelo numérico, considerando o caso de arrefecimento a água, utilizou-se no COMSOL uma esfera representativa dos dois lotes de pêssego com um raio médio de 32,3 mm. Parametrizou-se a temperatura inicial do modelo e a temperatura de escoamento não perturbado com 295,3K e 275K, respetivamente. Também as propriedades consideradas para o modelo de arrefecimento a água são as referidas na Tabela 3.1. O modelo numérico para o arrefecimento a água deverá representar a resposta térmica de um lote intermédio entre os lotes 1 e 2 de pêssego. Também para o caso de arrefecimento a água foi selecionada uma malha do tipo normal. O estudo realizado foi de 50 minutos, com um passo de 1 minuto, com uma tolerância relativa de 0,01. A variação da temperatura do modelo computacional foi registada a 1 cm do centro geométrico da esfera, contabilizando-se assim a existência do núcleo. Considerando a gama de coeficientes convectivos exposta em 3.3.4.11, considerou-se um coeficiente convectivo de 680 W/m<sup>2</sup>K. Este valor vai de encontro com a primeira gama de valores de coeficiente convectivo (206.07 - 1839.92 W/m<sup>2</sup>K) e também é compatível com a gama de valores da correlação semi-teórica de Vliert e Lampert (628.76 e 725.37 W/m<sup>2</sup>K) (Dincer, 1991). Para a validação do modelo numérico consideraram-se as propriedades exibidas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Parâmetros relativos à simulação de arrefecimento a água

Parâmetros	Valor
Raio	32,3 [mm]
Densidade, $\rho$	1105,6 [kg/m <sup>3</sup> ]
Condutibilidade Térmica, k	0,5510 [W/(m*K)]
Capacidade Térmica	3868,7 [J/(kg*K)]
Temperatura inicial	295,3 [K]
Temperatura de escoamento não perturbado	275 [K]
Coefficiente convectivo	680 [W/m <sup>2</sup> *K]
Duração do estudo	50 [min]

Na Figura 3.24 representa-se a variação da temperatura na sua forma adimensional para o lote 1 e 2 de pêssegos, e para o modelo computacional.

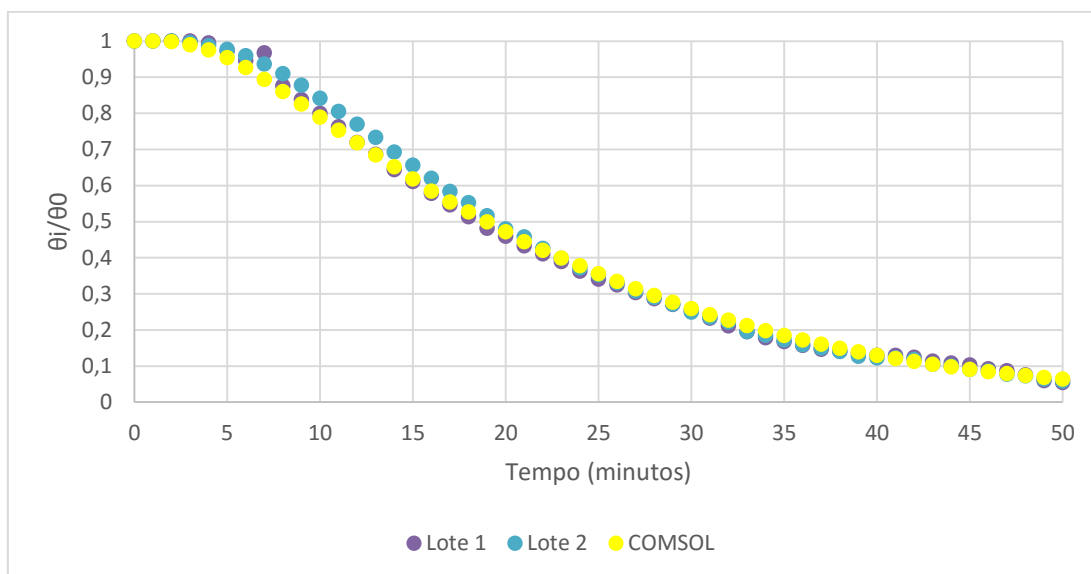


Figura 3.24 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o lote 1, lote 2 e modelo computacional, núcleo, arrefecimento a água

Analisando o gráfico da figura anteriormente representada, verifica-se a variação da temperatura na sua forma adimensional segue uma tendência exponencial para ambos os lotes e o modelo computacional. Até aos primeiros 20 minutos de simulação, a variação da temperatura no modelo é mais representativa da resposta térmica do lote 1 do que do lote 2. Ao serem atingidos os 20 minutos de ensaio, o comportamento da temperatura adimensional é semelhante nos dois lotes e no modelo, verificando-se uma quase sobreposição das curvas. O  $t_{1/2}$  para a curva de arrefecimento proveniente do COMSOL é de 19 minutos e o seu  $t_{7/8}$  ocorre aos 41 minutos. O Tempo de Meio Arrefecimento médio entre o lote 1 e 2 é de 19 minutos, não havendo diferença para o Tempo de Meio Arrefecimento obtido pelo COMSOL. O Tempo de Sete Oitavos médio entre o lote 1 e 2 é de 41 minutos, não havendo também diferença para o Tempo de Sete Oitavos obtido pelo COMSOL. Verifica-se assim que o modelo produzido no COMSOL é capaz de uma boa representação do comportamento térmico dos pêssegos verificado experimentalmente, para o caso de arrefecimento em água.

### 3.4.4. Comparação com Solução Analítica

A série infinita referente à equação (2.34) pode ser representada pelo primeiro termo desde que o número de Fourier seja superior a 0,2. Considerando a equação (X), relativa ao cálculo do número de Fourier, reorganizando os termos temos que a série infinita pode ser representada pelo primeiro termo para valores de tempo superiores a  $t = \frac{Fo \cdot r_o^2}{\alpha} = \frac{0,2 \cdot r_o^2}{\alpha}$

De forma a obter resultados equiparáveis às medições feitas no COMSOL, para um ponto 1 cm afastado do centro geométrico, a equação foi resolvida para  $r^* = \frac{r}{r_o} = \left( \frac{0,01}{0,0323} \right) = 0,31$ .

Os valores de variação de temperatura ao longo do tempo obtidos pela equação da série infinito são válidos para instantes de tempo superiores a 25.8 minutos (para números de Fourier superiores a 0,2). No caso de arrefecimento em água, o valor de número de Fourier superior a 0,2 corresponde à segunda metade do ensaio realizado (considerando um ensaio de 50 minutos).

#### 3.4.4.1. Solução analítica - Arrefecimento a ar

Para a obtenção da variação da temperatura na sua forma adimensional ao longo do tempo, consideraram-se as equações (2.41) e (2.42). Representa-se na Tabela 3.7 os parâmetros considerados que figuram nas equações anteriormente mencionadas.  $C_1$  e  $\zeta_1$  são obtidos através das equações (2.36) e (2.37), respetivamente.

Tabela 3.7 - Propriedades consideradas para a resolução analítica, arrefecimento a ar

Parâmetros	Valor
$r^*$	0,31
Massa específica, $\rho$	1105,6 [kg/m <sup>3</sup> ]
Condutibilidade térmica, $k$	0,5510 [W/(m*K)]
Capacidade térmica	3868,7 [J/(kg*K)]
Difusividade térmica	$1,3494 \cdot 10^{-7}$ [m <sup>2</sup> /s]
Temperatura inicial	294,3 [K]
Temperatura de escoamento não perturbado	274,7 [K]
Coeficiente convectivo	6 [W/m <sup>2</sup> *K]
Duração do estudo	360 [min]
Número de Biot	0,352
$\zeta_1$	0,992
$C_1$	1,103

Para o caso de arrefecimento a ar, a equação toma a forma:

$$\theta^* = 1,103 * \exp\left(- (0,992)^2 * \frac{(1,3494 * 10^{-7}) * t * 60}{0,0323^2}\right) * \frac{\text{sen}(0,992 * 0,31)}{0,992 * 0,31} \quad (3.6)$$

A variação da temperatura na sua forma adimensional, no núcleo, para o caso de arrefecimento a ar encontra-se representada na Figura 3.25.

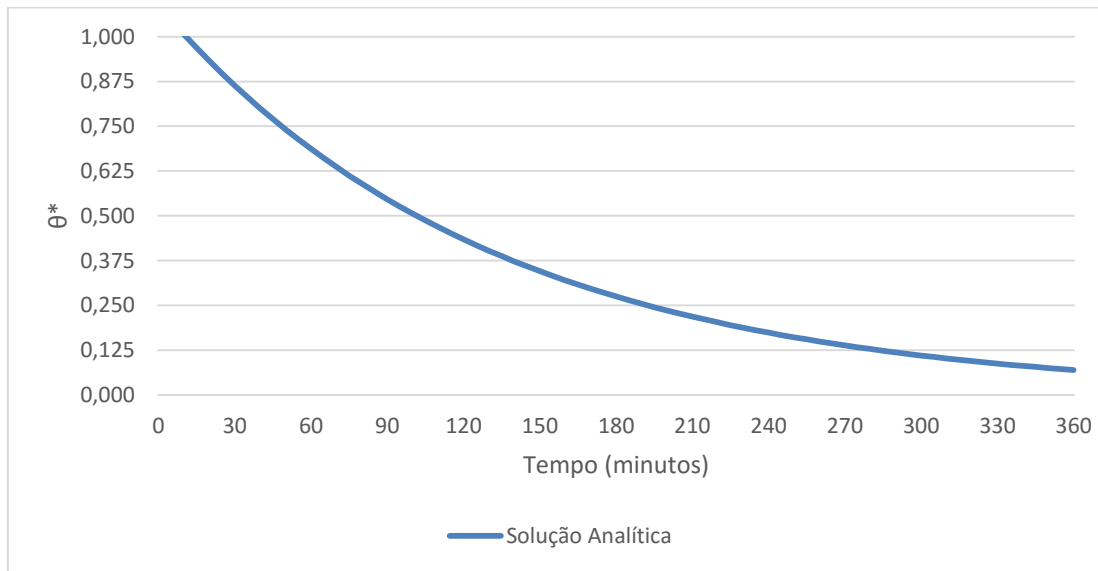


Figura 3.25 - Variação da temperatura na sua forma adimensional, Solução Analítica, arrefecimento a ar

Através da análise do gráfico representado anteriormente, verifica-se que a curva de arrefecimento apresenta uma variação do tipo exponencial. Resolvendo a equação 3.1 para  $\theta^*$  igual a 0,5 (para obter o Tempo de Meio Arrefecimento) e para 0,125 (para obter o Tempo de Arrefecimento de Sete Oitavos) obtêm-se os valores de 102 minutos para  $t_{1/2}$  e 283 minutos para  $t_{7/8}$ . Verifica-se assim uma diferença de 18,2% e 8,61% para o  $t_{1/2}$  e  $t_{7/8}$  obtidos pelo COMSOL, respetivamente.

### 3.4.4.2. Solução Analítica - Arrefecimento a água

Para a obtenção da variação da temperatura na sua forma adimensional ao longo do tempo, consideraram-se as equações (2.41) e (2.42). Representam-se na Tabela 3.8 os parâmetros considerados que figuram nas equações anteriormente mencionadas.  $C_1$  e  $\zeta_1$  são obtidos através das equações (2.36) e (2.37), respetivamente.

Tabela 3.8 - Propriedades consideradas para a resolução analítica, arrefecimento a água

Parâmetros	Valor
$r^*$	0,31
Massa específica, $\rho$	1105,6 [kg/m <sup>3</sup> ]
Condutibilidade Térmica, $k$	0,5510 [W/(m*K)]
Capacidade Térmica, $\alpha$	3868,7 [J/(kg*K)]
Temperatura inicial	295,3 [K]
Temperatura de escoamento não perturbado	275 [K]
Coeficiente convectivo	680 [W/m <sup>2</sup> *K]
Duração do estudo	50 [min]
$\zeta_1$	3,063
$C_1$	1,994

Para o caso de arrefecimento a água, a equação toma a forma:

$$\theta^* = 1,994 * \exp\left(- (3,063)^2 * \frac{(1,3494 * 10^{-7}) * t * 60}{0,0323^2}\right) * \frac{\text{sen}(3,063 * 0,31)}{1,994 * 0,31} \quad (3.7)$$

A variação da temperatura na sua forma adimensional, no núcleo, para o caso de arrefecimento a ar encontra-se representada na Figura 3.26.

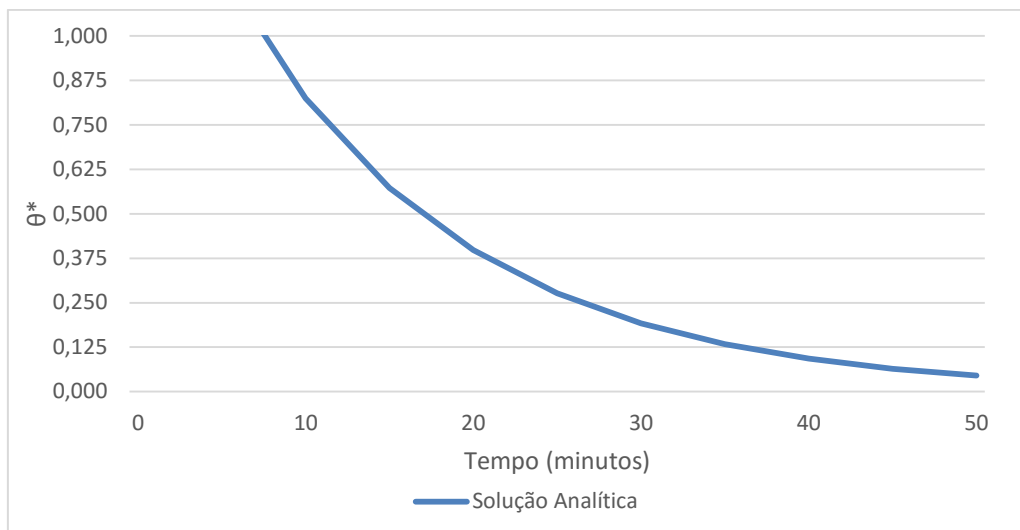


Figura 3.26 - Variação da temperatura na sua forma adimensional, Solução Analítica, Arrefecimento a Água

Através da análise do gráfico representado anteriormente, verifica-se que a curva de arrefecimento apresenta uma variação do tipo exponencial. Obtêm-se os valores de 22,8 minutos para  $t_{1/2}$  e 41,8 minutos para  $t_{7/8}$ . Verifica-se assim uma diferença de 14% e 2% para o  $t_{1/2}$  e  $t_{7/8}$  obtidos pelo COMSOL, respetivamente.

### 3.5. Nota conclusiva

Foi feita uma introdução ao Software de modulação computacional COMSOL Multiphysics® 5.2b, e ao pacote embutido de transmissão de calor. Foi feita a descrição da implementação do modelo computacional, referindo-se as propriedades geométricas (raio) e termofísicas (propriedades do material, temperaturas iniciais, temperaturas de escoamento não perturbado e coeficientes convectivos considerados). Demonstraram-se os menus incluídos no COMSOL e os passos adotados para a parametrização do modelo computacional, como também o tratamento de dados e configuração do COMSOL para a realização de estudos paramétricos. Procedeu-se posteriormente à validação do modelo computacional, exibindo-se as variações de temperatura dos vários lotes experimentais para os casos considerados de arrefecimento a ar e água. Demonstrou-se a validação do modelo computacional comparando-se os valores obtidos de Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento, e os valores obtidos para os lotes experimentais. Realizou-se a comparação dos resultados obtidos pelo COMSOL e os resultados obtidos aquando a utilização da solução analítica aproximada para o caso de condução de calor em regime transitório numa esfera.

Através da confirmação da validação do modelo computacional, conclui-se que este é apto para descrever o comportamento térmico dos lotes de pêssigo para ambos os casos de

arrefecimento a ar e arrefecimento a água. Assim, no capítulo seguinte, irá ser implementada a função de estudo paramétrico, de modo a poder ser estudado o efeito da variação do diâmetro do pêsego, o efeito da variação da sua temperatura inicial, e o efeito da variação da temperatura de escoamento não perturbado.



## 4. Análise e discussão de resultados

### 4.1. Introdução

O tempo de arrefecimento dos pêssegos depende, entre outros fatores, do tamanho da fruta, da sua temperatura inicial aquando a sua entrada no sistema de arrefecimento e da temperatura do fluido de arrefecimento. Ao longo do Capítulo 4 será realizado um estudo paramétrico, onde a partir da componente *Parametric Sweep* presente no COMSOL Multiphysics® são variados os fatores previamente mencionados. Será feito o estudo do efeito de cada variável de forma individual. Primeiramente expor-se-á o efeito da variação do diâmetro do modelo computacional validado no Capítulo 3. Indicar-se-á a gama de calibres considerada para a variação do diâmetro do modelo computacional. Será feito o estudo em detalhe para o caso particular do primeiro calibre, o Calibre B (pois é o calibre onde os pêssegos estudados para a validação do modelo numérico se enquadram). Os restantes calibres considerados encontram-se no capítulo Anexo. Inclui-se também no subcapítulo 4.2.1 a comparação global dos primeiros diâmetros de cada calibre. Posteriormente representa-se o efeito da variação da temperatura inicial do modelo computacional, concluindo-se o subcapítulo com o estudo da variação da temperatura do fluido de arrefecimento.

### 4.2. Estudo paramétrico

O estudo do efeito da variação do diâmetro no tempo de arrefecimento encontra-se representado no subcapítulo 4.2.1. De forma a estudar o efeito que a variação do diâmetro produz no tempo de arrefecimento do modelo, compara-se a variação da temperatura na sua forma adimensional entre os vários diâmetros considerados no núcleo e na superfície. É também verificado o aumento do Tempo de Meio Arrefecimento e do Tempo de Sete Oitavos com o aumento do diâmetro. São produzidas e expostas as correlações obtidas para os  $t_{1/2}$  e  $t_{7/8}$  para os diâmetros do Calibre B e de todos os diâmetros de todos os calibres. É também estudado o aumento do gradiente térmico com o aumento do diâmetro do modelo computacional, comparando diretamente os Tempos de Meio Arrefecimento para o núcleo e a superfície do mesmo diâmetro. Estes estudos são feitos para ambos os casos de arrefecimento a ar e água. Para os casos de estudo do efeito que a variação da temperatura inicial (representado no subcapítulo 4.2.2) e da temperatura de escoamento não perturbado (representado no subcapítulo 4.2.3) produzem no tempo de arrefecimento do modelo computacional, compara-se a variação da temperatura ao longo do tempo de

ensaio para os vários diâmetros considerados. É exposto o valor da temperatura do modelo computacional dos vários diâmetros ao longo de cada hora de simulação, para o caso de arrefecimento a ar, e a cada 10 minutos para o caso de arrefecimento a água. Representa-se também a diferença em °C entre a temperatura do núcleo e da superfície para o mesmo instante de tempo, para ambos os casos de arrefecimento a ar e a água.

#### 4.2.1. Efeito da variação do diâmetro

De forma a ser estudado o efeito do tamanho do pêsego no seu tempo de arrefecimento, o diâmetro do modelo computacional foi variado de acordo com as várias gamas de calibres referidos no Jornal Oficial da União Europeia (2011). Pela norma de comercialização aplicável aos pêsegos, os calibres tabelados e correspondentes diâmetros podem ser observados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Calibres de pêsego em função do diâmetro

Calibre	Diâmetro	
	De (mm)	a (mm)
D	51	56
C	56	61
B	61	67
A	67	73
AA	73	80
AAA	80	90
AAAA	>90	

De acordo com a Tabela 4.1, os pêsegos utilizados para a recolha de dados experimentais, ao possuírem um diâmetro médio de 64,6 mm, pertencem ao calibre B.

##### 4.2.1.1. Arrefecimento a ar

Com base na parametrização feita para a validação do modelo numérico, consideraram-se as condições de ensaio referidas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Condições de ensaio para o arrefecimento a ar

Coefficiente convectivo [W/m <sup>2</sup> K]	Temperatura inicial [K]	Temperatura do fluido [K]	Duração do ensaio (min)
6	294,3	274,7	600

A partir dos dados referidos anteriormente, foi registada a variação da temperatura no modelo computacional em dois pontos distintos, na superfície e no núcleo (considerando-se uma distância de 1 cm a partir do centro, de forma a contabilizar a existência de um caroço no modelo). O diâmetro do modelo foi variado de 1 em 1 mm, e o tempo de ensaio de 1 em 1 minuto para cada diâmetro, perfazendo um tempo total de simulação de 600 minutos para cada um dos diâmetros considerados, com o intuito de ser possível atingir a temperatura adimensional de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em todos os calibres simulados.

#### 4.2.1.2. Calibre D

Os pêssegos do calibre D possuem um diâmetro compreendido entre 51 e 56 mm (inclusive). A variação da temperatura na forma adimensional, no núcleo, para os diferentes diâmetros do Calibre D está representada no gráfico da Figura 4.1.

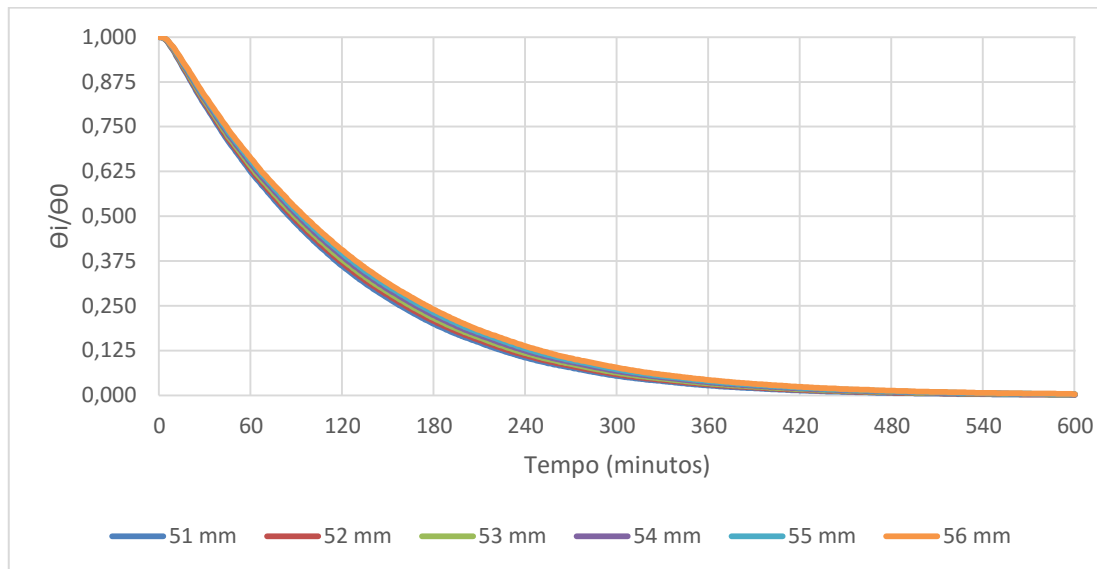


Figura 4.1 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre D, Núcleo

Analisando o decaimento de temperatura na sua forma adimensional, é possível observar que esta apresenta uma forma exponencial, existindo um decréscimo acentuado no início do processo de arrefecimento. A temperatura diminui a um ritmo mais moderado à medida que se aproxima da temperatura final. Apesar de não serem notórias alterações significativas, comparando o Tempo de Meio Arrefecimento e o Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para valores de diâmetro adjacentes, o aumento do tempo de arrefecimento torna-se mais evidente para o aumento do Tempo de Meio Arrefecimento entre os diâmetros de 51 e 56 mm.

Os instantes de tempo para os valores de temperatura adimensional de 0,5 e 0,125 obtidos a partir do COMSOL, tal como a sua diferença em percentagem e em minutos, estão representados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Calibre D, Núcleo

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
51	85	225	164,7	140,0
52	87	229	163,2	142,0
53	89	234	162,9	145,0
54	91	239	162,6	148,0
55	93	244	162,3	151,0
56	95	250	163,1	155,0

No caso do tempo de arrefecimento no núcleo, com o aumento de 1 mm no modelo, observa-se um incremento no  $t_{\frac{1}{2}}$  de 2 minutos, e de 4 a 6 minutos no  $t_{\frac{7}{8}}$ . Comparando o  $t_{\frac{1}{2}}$  entre os diâmetros de 51 mm e 56 mm é possível verificar que este varia entre 85 e 95 minutos (diferença de 10 minutos), respetivamente. Tal variação resulta num aumento de 11,8% no Tempo de Meio Arrefecimento. O  $t_{\frac{7}{8}}$  varia entre 225 e 250 minutos (diferença de 25 minutos), verificando-se um aumento de 11,1% no Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento. A diferença em percentagem entre o Tempo de Meio Arrefecimento e o tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para este calibre varia entre os 164,7% e 163,2%. Com o aumento de diâmetro, a diferença em minutos entre o Tempo de Meio Arrefecimento e o Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento aumenta progressivamente entre 2 a 4 minutos, perfazendo 15 minutos comparando os diâmetros de 51 e 56 mm.

Considerando os instantes de tempo representados na Tabela 4.3 para o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos no COMSOL para os diferentes diâmetros correspondentes ao Calibre D, obtém-se o gráfico e correlações representados na Figura 4.2.

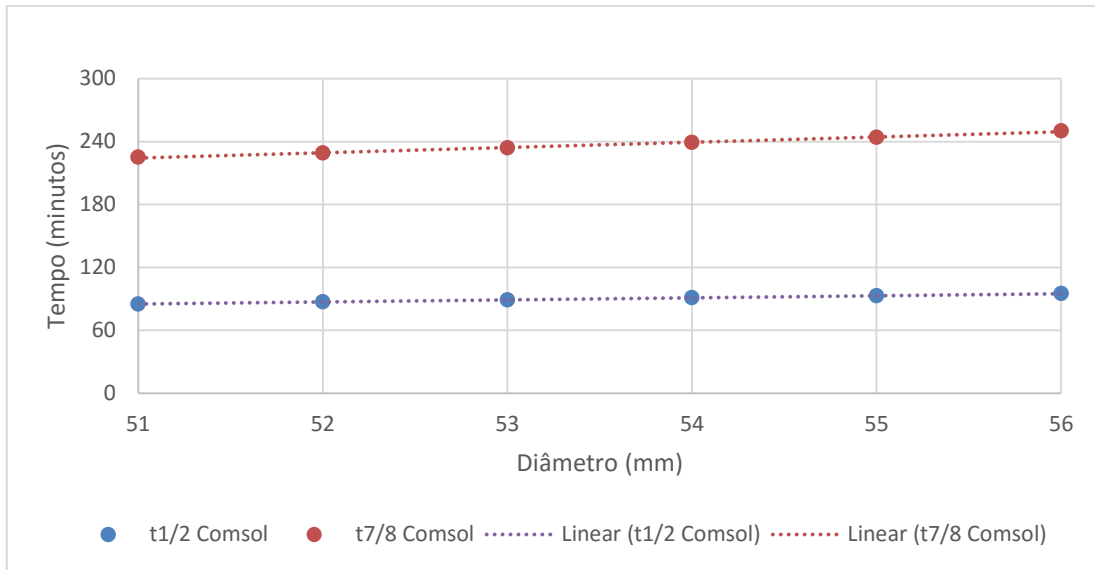


Figura 4.2 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre D, Núcleo

Para o arrefecimento a ar, considerando o Calibre D, o Tempo de Meio Arrefecimento em minutos em função do diâmetro, para o núcleo, pode ser dado pela seguinte correlação:

$$t = 5 * Diâmetro - 30,67$$

Com um  $R^2$  igual a 0,997.

O Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em minutos pode ser dado pela seguinte correlação:

$$t = 2 * Diâmetro - 17$$

Com um  $R^2$  igual a 1,000.

O elevado valor de  $R^2$  sugere uma forte correlação entre os valores de Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para o núcleo em função do diâmetro obtidos pela reta de regressão.

A variação da temperatura na superfície para os diferentes diâmetros do calibre D está representada no gráfico da Figura 4.3.

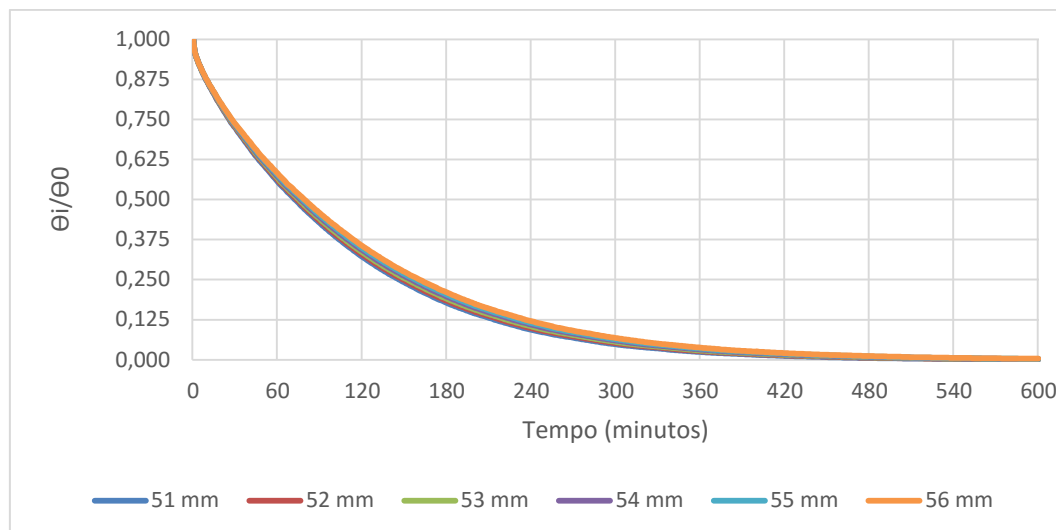


Figura 4.3 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre D, Superfície

Comparando o processo de arrefecimento da superfície com o que foi anteriormente observado no caso do arrefecimento do núcleo, é possível concluir que este se dá de uma forma muito mais acentuada. Tal disparidade entre variações de temperatura sugere a existência de um gradiente térmico do interior para a superfície durante o seu arrefecimento. De forma semelhante ao que foi anteriormente observado, é evidente o aumento do tempo de arrefecimento com o aumento de diâmetro, no caso da variação da temperatura à superfície, embora que menos acentuado, comparativamente ao aumento do tempo de arrefecimento no núcleo.

Na Tabela 4.4 estão representados os instantes de tempo para os valores de temperatura adimensional 0,5 e 0,125 obtidos a partir do COMSOL, tal como a sua diferença em percentagem e em minutos.

Tabela 4.4 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre D

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
51	72	214	197,2	142,0
52	74	218	194,6	144,0
53	75	223	197,3	148,0
54	76	227	198,7	151,0
55	78	232	197,4	154,0
56	79	236	198,7	157,0

Relativamente à variação da temperatura na superfície, o aumento de 1 mm no diâmetro resulta no aumento do Tempo de Meio Arrefecimento de 1 a 2 minutos. Para o caso do Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento, o aumento de 1 mm no diâmetro implica um aumento de 4 a 5 minutos no tempo de arrefecimento. Analisando a disparidade entre o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para o caso do arrefecimento da superfície do modelo produzido no COMSOL, é possível observar que a diferença entre o  $t_{\frac{1}{2}}$  e  $t_{\frac{7}{8}}$  é mais pronunciada face ao arrefecimento no núcleo, variando entre 197,2 e 198,7% (164,7 a 163,2% para o caso do núcleo), embora a sua diferença em minutos seja semelhante ao caso do arrefecimento no núcleo. O aumento de diâmetro de 51 para 56 mm resulta num incremento do valor de  $t_{\frac{1}{2}}$  de 72 para 79 minutos (aumento de 7 minutos), resultando numa subida de 9,7% (face aos 11,8% do núcleo). No caso do  $t_{\frac{7}{8}}$ , existe uma variação de 214 para 236 minutos (aumento de 22 minutos), verificando-se um aumento de 10,3% (face aos 11,1% do núcleo).

Tendo em consideração os instantes de tempo representados na Tabela 4.4 para o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos no COMSOL para os diferentes diâmetros correspondentes ao Calibre D, no caso da superfície, obtém-se o gráfico e correlações representados na Figura 4.4.

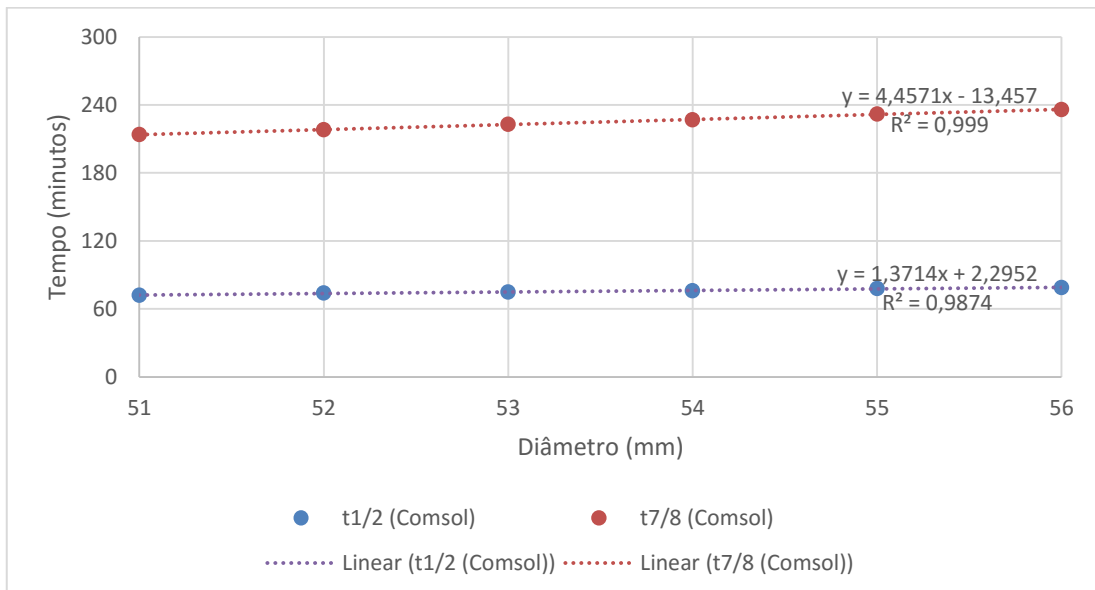


Figura 4.4 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre D, Superfície

Para o calibre D, o Tempo de Meio Arrefecimento, em minutos, em função do diâmetro, para a superfície, pode ser dado pela seguinte correlação:

$$t = 4,46 * Diâmetro - 13,46$$

Com um  $R^2$  igual a 0,999.

O Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento pode ser dado pela seguinte correlação:

$$t = 1,37 * Diâmetro - 2,30$$

Com um  $R^2$  igual a 0,987.

Também para o caso do arrefecimento na superfície, o elevado valor de  $R^2$  sugere uma forte correlação entre os valores de Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro obtidos pela reta de regressão.

Outro aspeto importante no arrefecimento de frutas e vegetais, é a diferença de temperatura entre o núcleo e a superfície. Um aumento na resistência de condução (neste caso devido ao aumento de diâmetro), traduz-se num gradiente térmico da superfície para o núcleo. Se este gradiente for muito acentuado, pode-se dar o caso de, apesar da temperatura na superfície ser indicada para o armazenamento, o núcleo ainda estar a uma temperatura elevada, resultando na deterioração do produto durante o armazenamento. A variação da temperatura ao longo do tempo para ambas superfície e núcleo, para o diâmetro de 51 mm está representada na Figura 4.5.

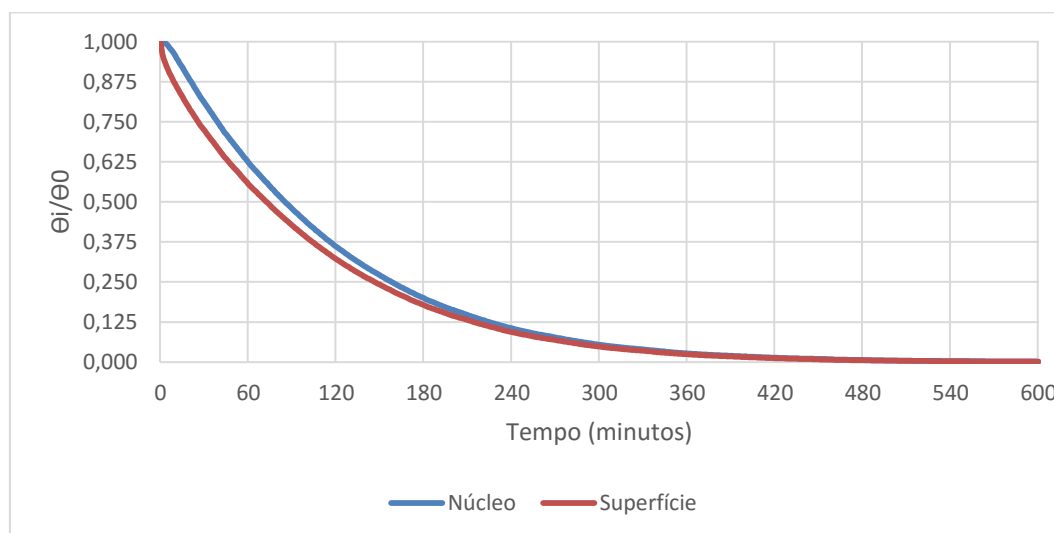


Figura 4.5 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 51mm, Núcleo e Superfície

Comparando o decaimento de temperatura entre o núcleo e a superfície observado no gráfico da Figura 4.5 para o diâmetro de 51 mm, torna-se evidente a diferença que existe entre ambos, sendo notório a curva de arrefecimento mais pronunciada para a superfície,

face ao núcleo. Posteriormente ao instante de tempo para a temperatura adimensional igual a 0,125, deixa de ser significativa a diferença entre ambos. Na Tabela 4.5 estão representados os Tempo de Meio Arrefecimento obtido no COMSOL para o núcleo e superfície, e respetiva diferença entre ambos, para os vários diâmetros correspondentes ao Calibre D.

Tabela 4.5 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície para os diferentes diâmetros do Calibre D

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
51	85	72	15,3	13,0
52	87	74	14,9	13,0
53	89	75	15,7	14,0
54	91	76	16,5	15,0
55	93	78	16,1	15,0
56	95	79	16,8	16,0

Relativamente ao diâmetro de 51 mm representado na Figura 4.5, o  $t_{1/2}$  para o núcleo e para a superfície é de 85 e 72 minutos, respetivamente, resultando numa diferença de 15,3% entre os dois valores. A diferença do Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo para a superfície no diâmetro de 51 mm é mais significativa do que a diferença entre o Tempo de Meio Arrefecimento no núcleo para 51 e 56 mm (11,8%, diferença de 10 minutos), e do Tempo de Meio Arrefecimento na superfície de 51 para 56mm (9,7%). A diferença entre o  $t_{1/2}$  do núcleo para a superfície tende a aumentar à medida que se incrementa o diâmetro do modelo. Na Tabela 4.6 estão representados o  $t_{7/8}$  do núcleo e superfície e respetiva diferença entre ambos, para os vários diâmetros correspondentes ao calibre D.

Tabela 4.6 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície para os diferentes diâmetros do Calibre D

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
51	225	214	4,9	11,0
52	229	218	4,8	11,0
53	234	223	4,7	11,
54	239	227	5,	12,0
55	244	232	4,9	12,0
56	250	236	5,6	14,0

Para o diâmetro de 51 mm representado na Figura 4.5 o  $t_{7/8}$  para o núcleo e para a superfície é de 225 e 214 minutos, respetivamente, resultando numa diferença de 4,9% (11 minutos). A diferença do tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo para a superfície no diâmetro de 51 mm é menos significativa do que a diferença entre o tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento no núcleo de 51 para 56 mm (11,1%, 25 minutos), e do que o aumento do tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento da superfície de 51 para 56 mm (10,3%, 22 minutos). A diferença entre o  $t_{7/8}$  do núcleo para a superfície tende a aumentar à medida que se incrementa o diâmetro do modelo.

#### 4.2.1.3. Comparação Global - Arrefecimento a ar

De forma a realizar uma comparação global para o efeito do aumento do diâmetro do modelo no tempo de arrefecimento deste, foram considerados os primeiros diâmetros de cada um dos calibres referidos na Tabela 4.1 (51, 56, 61, 67, 73, 80, 90 mm como também o diâmetro de 100 mm). Serão expostos os resultados relativos à variação da temperatura adimensional, como também os valores do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para os vários diâmetros considerados para ambos núcleo e superfície. São referidas as correlações obtidas para o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento de ambos núcleo e superfície para a totalidade dos diâmetros de todos os calibres referidos na Tabela 4.1. Representa-se na Figura 4.6 a variação da temperatura adimensional no núcleo ao longo do tempo, para os vários diâmetros considerados anteriormente.

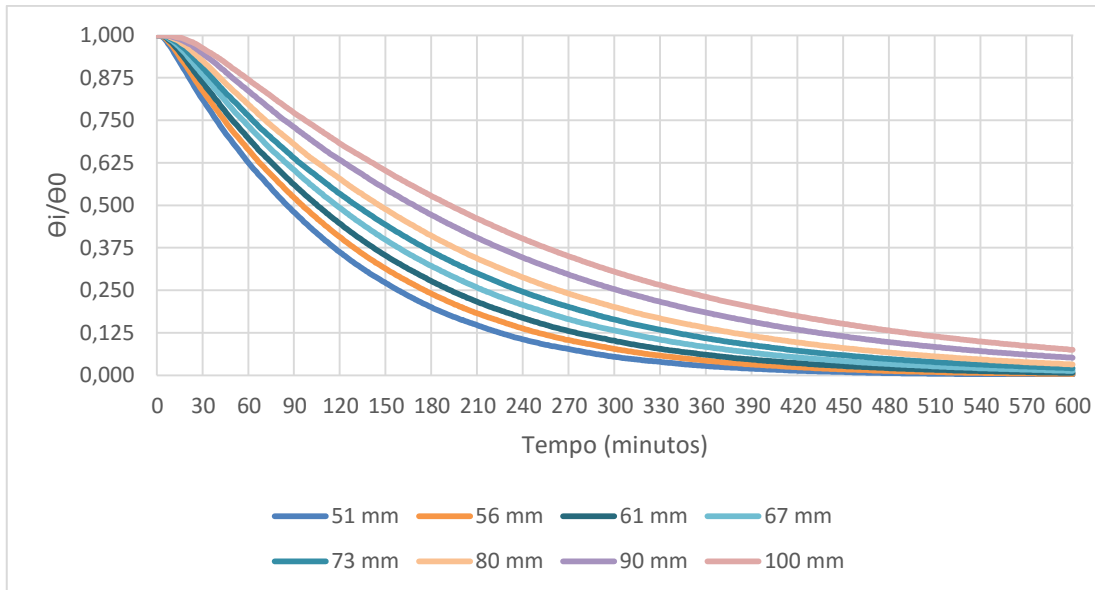


Figura 4.6 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para vários diâmetros, Núcleo

Através da análise do gráfico representado anteriormente, observa-se que com o aumento do diâmetro e calibre do modelo, o tempo de arrefecimento também se torna mais elevado. Verifica-se também um atraso na variação da temperatura adimensional do modelo nos instantes iniciais do processo de arrefecimento, para todos os diâmetros. Este atraso torna-se cada vez mais elevado à medida que se aumenta o diâmetro do modelo. Enquanto os modelos de diâmetro mais reduzido têm a sua temperatura adimensional reduzida quase na totalidade, nos instantes finais do ensaio, os modelos de 100 mm ainda denotam um valor de 0,076 para a temperatura adimensional.

Representa-se na Figura 4.7 a variação da temperatura adimensional na superfície ao longo do tempo, para os vários diâmetros considerados.

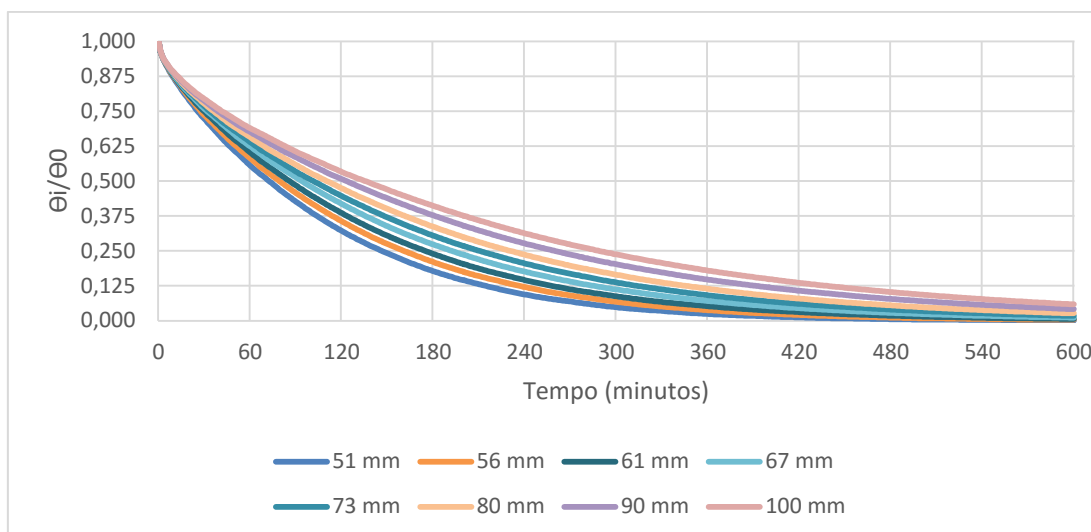


Figura 4.7 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para vários diâmetros, Superfície

Analisando o gráfico exibido anteriormente, verifica-se um aumento do tempo de arrefecimento da superfície através da incrementação do diâmetro do modelo. Verifica-se uma redução da temperatura adimensional a partir dos instantes iniciais, não existindo qualquer atraso no processo de arrefecimento. Analogamente ao que se verificou na variação da temperatura adimensional no núcleo do modelo computacional, também nos instantes finais do ensaio o modelo com diâmetro de 100 mm não consegue alcançar uma temperatura adimensional nula (equilíbrio térmico), tendo uma temperatura adimensional de cerca de 0,056. Na Tabela 4.7 representa-se o Tempo de Meio Arrefecimento de ambos núcleo e superfície, como também a sua diferença em percentagem e em minutos para os vários diâmetros seleccionados.

Tabela 4.7 - Tempo de Meio Arrefecimento para ambos núcleo e superfície, diferença em percentagem e em minutos para os vários diâmetros considerados, arrefecimento a ar

Diâmetro (mm)	t1/2 COMSOL (Núcleo) (min)	t1/2 COMSOL (Superfície) (min)	Diferença entre Núcleo e Superfície (%)	Diferença entre Núcleo e Superfície (min)
51	85	72	15,3	13,0
56	95	79	16,8	16,0
61	105	86	18,1	19,0
67	117	94	19,7	23,0
73	130	101	22,3	29,0
80	145	110	24,1	35,0
90	168	123	26,8	45,0
100	192	135	29,7	57,0

Com o incremento do diâmetro do modelo verifica-se um aumento do Tempo de Meio Arrefecimento em ambos núcleo e superfície. Comparando os diâmetros de 51 e 100 mm, verifica-se um aumento de 2,3 vezes no  $t_{1/2}$  do núcleo (sendo necessários 107 minutos adicionais de tempo de arrefecimento para os modelos com diâmetro de 100 mm face aos modelos com diâmetro de 51 mm), e um aumento de 1,9 vezes para o  $t_{1/2}$  da superfície (sendo necessários 63 minutos adicionais de tempo de arrefecimento para os modelos de diâmetro de 100 mm em comparação com os modelos de 51 mm). O aumento mais pronunciado do Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo deve-se à resistência de transmissão de calor por condução mais elevada causada pelo incremento do diâmetro do modelo. A diferença em minutos e em percentagem entre o núcleo e a superfície torna-se mais elevada à medida que se incrementa o diâmetro do modelo. Assim, para diâmetros mais elevados verifica-se uma maior inércia térmica do que nos modelos de menores dimensões (diferença de 13 minutos para o  $t_{1/2}$  do núcleo e superfície para os modelos de 51 mm, e diferença de 57 minutos para o  $t_{1/2}$  núcleo e superfície para os modelos de 100 mm).

Representa-se na Figura 4.8 a variação do Tempo de Meio Arrefecimento, para o núcleo e superfície, para a totalidade dos diâmetros considerados, como também as correlações obtidas para o  $t_{1/2}$ .

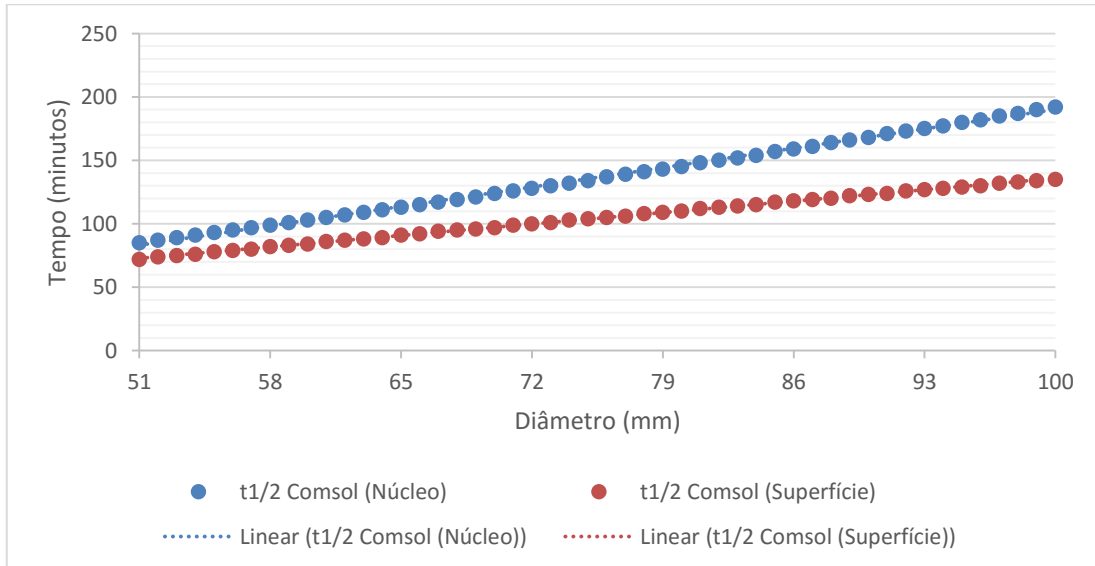


Figura 4.8 - Tempo de Meio Arrefecimento para o Núcleo e Superfície dos vários diâmetros

A variação do Tempo de Meio Arrefecimento com o incremento do diâmetro do modelo, para ambos núcleo e superfície, apresenta um comportamento próximo do linear. O Tempo de Meio Arrefecimento, em minutos, em função do diâmetro, para o núcleo pode ser dado pela seguinte correlação:

$$t = 2,182 * Diâmetro - 28,175$$

Com um R<sup>2</sup> de 0,999.

O Tempo de Meio Arrefecimento, em minutos, em função do diâmetro, para a superfície pode ser dado por:

$$t = 1,287 * Diâmetro - 7,111$$

Com um R<sup>2</sup> de 1,000.

Os elevados valores de R<sup>2</sup> sugerem uma forte correlação entre os valores de Tempo de Meio Arrefecimento obtidos, em função do diâmetro.

Na Tabela 4.8 representa-se o Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento de ambos núcleo e superfície, como também a sua diferença em percentagem e em minutos para os vários diâmetros selecionados.

Tabela 4.8 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para ambos núcleo e superfície, diferença em percentagem e em minutos para os vários diâmetros considerados, arrefecimento a ar

Diâmetro (mm)	t <sub>7/8</sub> COMSOL (Núcleo) (min)	t <sub>7/8</sub> COMSOL (Superfície) (min)	Diferença entre Núcleo e Superfície (%)	Diferença entre Núcleo e Superfície (min)
51	225	214	4,9	11,0
56	250	236	5,6	14,0
61	275	258	6,2	17,0
67	307	285	7,2	22,0
73	340	314	7,6	26,0
80	377	345	8,5	32,0
90	433	391	9,7	42,0
100	491	438	10,8	53,0

Com o aumento do diâmetro do modelo é possível observar um incremento do instante de tempo do Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em ambos núcleo e superfície. O aumento do t<sub>7/8</sub> para o núcleo entre os diâmetros de 51 e 100 mm é de 2,2 vezes (sendo necessária uma permanência adicional dos modelos com diâmetro de 100 mm de 266 minutos no sistema de arrefecimento, comparativamente aos modelos de 51 mm), e um aumento de 2,1 vezes para o instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para a superfície (verificando-se a necessidade de uma permanência adicional de 224 minutos no sistema de arrefecimento). A diferença de minutos e de

percentagem para o  $t_{7/8}$  entre o núcleo e superfície torna-se mais elevada à medida que se aumenta o diâmetro do modelo.

Na Figura 4.9 representa-se a variação do instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento, para ambos o núcleo e a superfície, em função do diâmetro. São também apresentadas as correlações obtidas para o  $t_{7/8}$ .

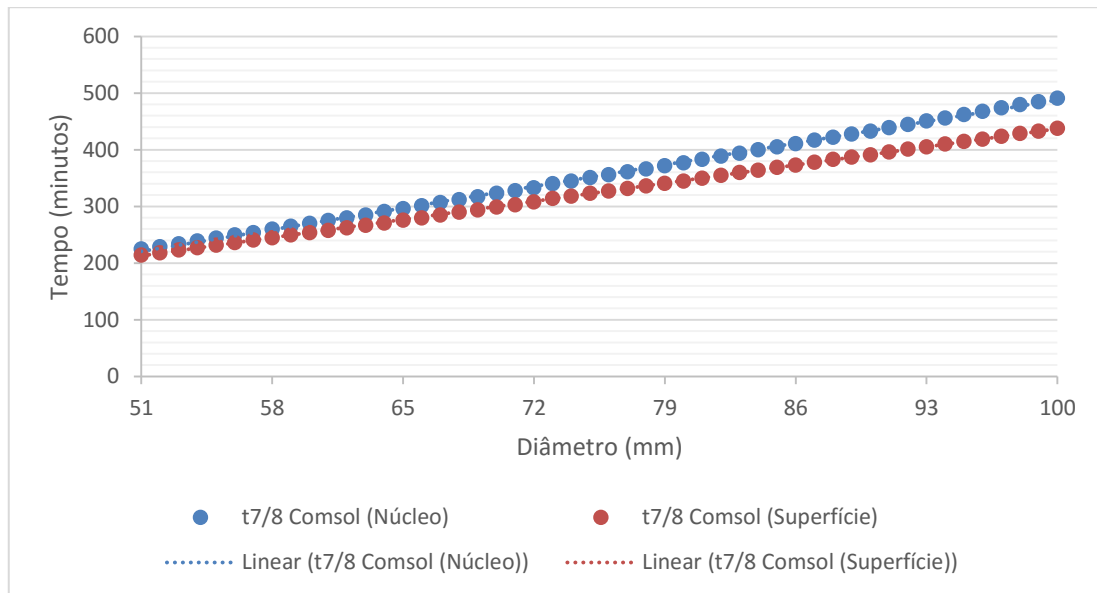


Figura 4.9 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para o Núcleo e Superfície dos vários diâmetros

A variação do instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento apresenta um comportamento linear, para ambos núcleo e superfície. O  $t_{7/8}$ , em minutos, em função do diâmetro, para o núcleo, é dado pela seguinte correlação:

$$t = 5,456 * Diâmetro - 57,569$$

Com um  $R^2$  de 1,000.

O  $t_{7/8}$ , em minutos, em função do diâmetro, para a superfície, pode ser dado por:

$$t = 4,588 * Diâmetro - 21,399$$

Com um  $R^2$  de 1,000.

Os elevados valores de  $R^2$  sugerem uma forte correlação entre os valores obtidos para o instante de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro.

#### 4.2.1.4. Arrefecimento a água

Considerando os parâmetros selecionados na fase de parametrização do modelo numérico, aplicaram-se as condições de ensaio mencionadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Condições de ensaio para o arrefecimento a água

Coeficiente convectivo [W/m <sup>2</sup> K]	Temperatura inicial [K]	Temperatura do fluido [K]	Duração do ensaio (min)
680	295,3	275	120

A partir dos dados expostos na tabela anterior, foi registada a variação da temperatura no modelo computacional na superfície e a 1 cm do centro (de forma a considerar o efeito do núcleo do modelo). O diâmetro do modelo foi incrementado de 1 em 1 mm, desde os 51 mm até aos 100 mm. A temperatura foi registada de 1 em 1 minuto, perfazendo 120 minutos de ensaio, para cada diâmetro considerado.

#### 4.2.1.5. Calibre D

A variação da temperatura adimensional do núcleo dos modelos de calibre D (diâmetro compreendido entre 51 e 56 mm, inclusive) ao longo do tempo encontra-se representada na Figura 4.10.

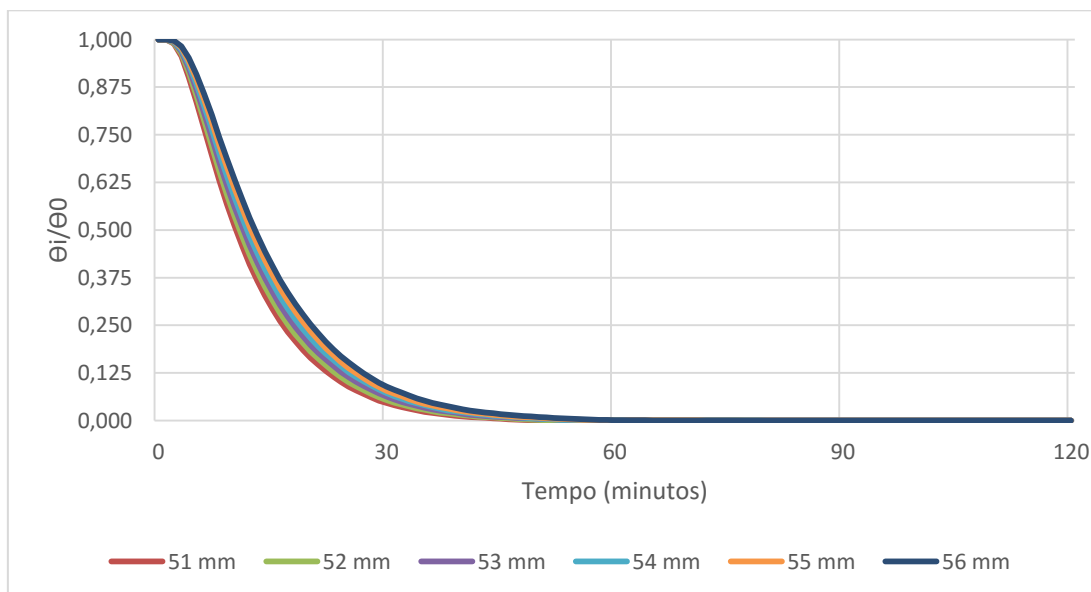


Figura 4.10 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre D, Núcleo

Observando o gráfico anterior, é possível verificar que, após o atraso inicial do processo de arrefecimento, a temperatura decresce rapidamente. A curva de arrefecimento tem formato exponencial. O decaimento de temperatura após o atraso inicial apresenta um decréscimo próximo do linear até ser atingido o instante de tempo de Tempo de Sete

Oitavos de Arrefecimento. Após ser atingido o  $t_{7/8}$  a redução da temperatura dá-se de forma mais morosa.

Na Tabela 4.10 representam-se os valores de Tempo de Meio Arrefecimento e instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL para o caso de arrefecimento a água, para os vários diâmetros do Calibre D. Estão também expostas as diferenças em percentagem e em minutos entre o Tempo de Meio Arrefecimento e o Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento.

Tabela 4.10 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Calibre D, Núcleo

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
51	10	22	120,0	12,0
52	11	23	109,1	12,0
53	11	24	118,3	13,0
54	12	25	108,3	13,0
55	12	26	116,7	14,0
56	13	27	107,7	14,0

Com o incremento de 1 mm no diâmetro, observa-se um incremento de 1 minuto no tempo de arrefecimento entre os diâmetros de 51 e 52 mm, 53 e 54 mm, e 55 e 56 mm. O  $t_{1/2}$  varia entre 10 e 13 minutos (aumento de 3 minutos), verificando-se um aumento de 30,0%, e o  $t_{7/8}$  varia entre 22 e 27 minutos (aumento de 5 minutos), verificando-se um aumento de 22,7%. O instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento aumenta 1 minuto a cada incremento de 1 mm no diâmetro. A diferença em percentagem entre o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento varia entre 107,7 e 120%. A diferença em minutos aumenta com o incremento do diâmetro, e varia entre 12 e 14 minutos.

Através dos instantes de tempo para o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento representados na Tabela 4.10, relativos ao núcleo dos modelos do calibre D, obtém-se o gráfico representado na Figura 4.11.

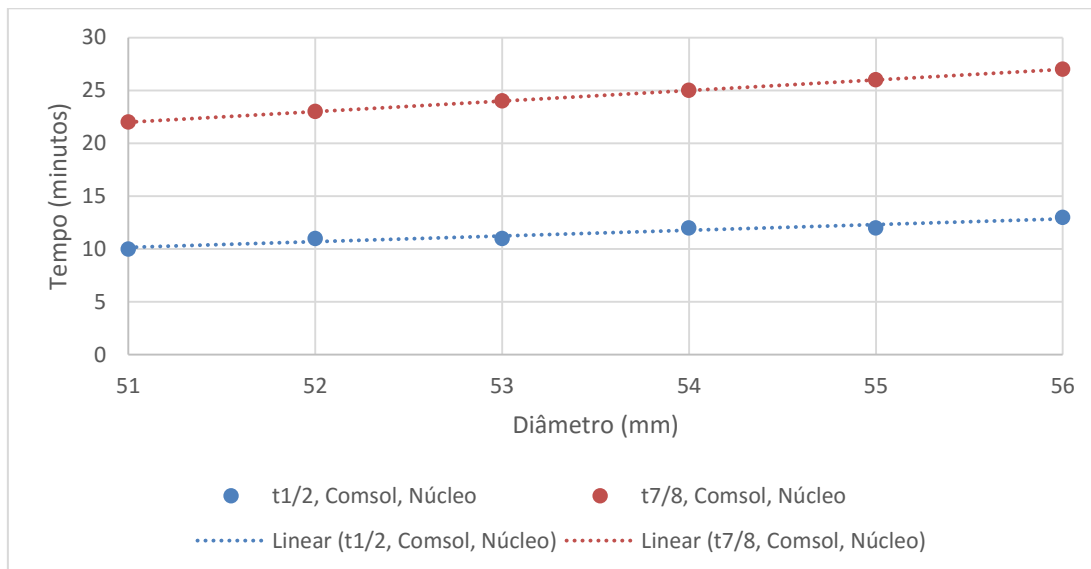


Figura 4.11 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre D, Núcleo

Para o arrefecimento a água, considerando o calibre D, o Tempo de Meio Arrefecimento em minutos, em função do diâmetro, para o núcleo, pode ser dado pela seguinte correlação:

$$t = \text{Diâmetro} - 29$$

Com um  $R^2$  igual a 1,000.

O Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em minutos pode ser dado pela seguinte correlação:

$$t = 0,543 * \text{Diâmetro} - 17,53$$

Com um  $R^2$  igual a 1,000.

Representa-se na Figura 4.12 a variação da temperatura adimensional na superfície, para os vários diâmetros considerados, correspondentes ao calibre D.

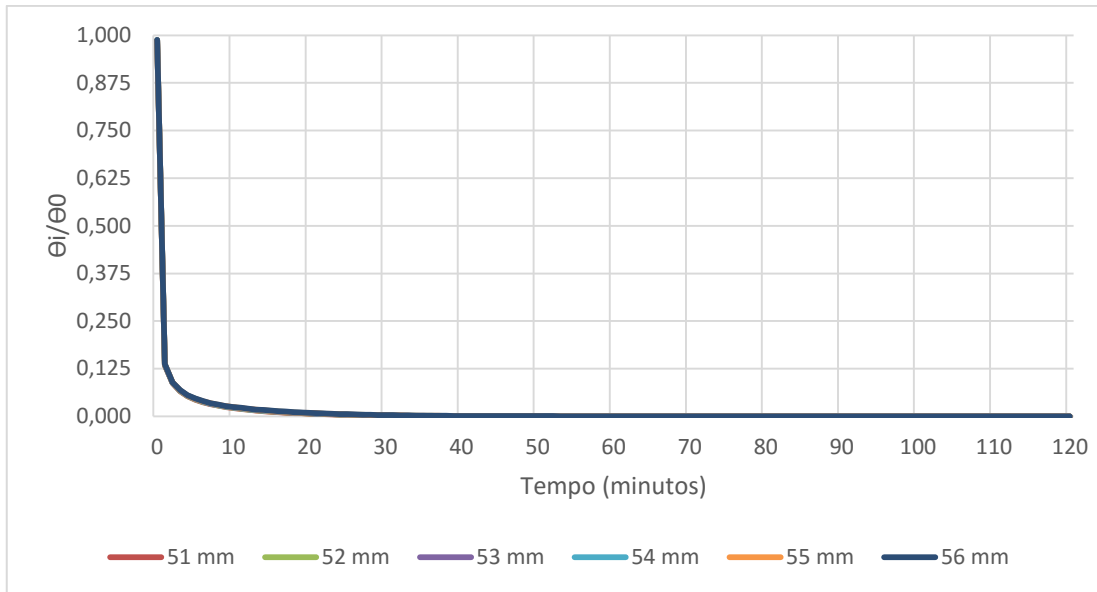


Figura 4.12 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre D, Superfície

O arrefecimento da superfície dá-se de forma mais acentuada do que no núcleo. Comparando a variação da temperatura da superfície com a que foi observada anteriormente no gráfico da Figura 4.10, conclui-se que se dá um gradiente térmico acentuado, do núcleo para a superfície. A redução da temperatura da superfície dá-se fundamentalmente durante os primeiros 20 minutos do processo de arrefecimento.

Na Tabela 4.11 representam-se os valores de Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos para a superfície dos modelos de calibre D sujeitos ao arrefecimento a água.

Tabela 4.11 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre D

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
51	3	72	2300,0	69,0
52	3	73	2333,3	70,0
53	3	73	2333,3	70,0
54	3	74	2366,7	71,0
55	3	75	2400,0	72,0
56	3	75	2400,0	72,0

Com o aumento de 1 mm no diâmetro não se observam variações no  $t_{1/2}$ . Este mantém um valor de 3 segundos para a totalidade dos diâmetros. O  $t_{7/8}$  varia entre 72 e 75 segundos. Verifica-se uma diferença compreendida entre 10 e 13 minutos entre o Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e o da superfície. O gradiente térmico aumenta à medida que o ensaio decorre, verificando-se uma diferença de 21 a 26 minutos para o Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e da superfície. Considerando a escala de tempo, verifica-se que embora a diferença entre o  $t_{1/2}$  e o  $t_{7/8}$  em segundos varie entre 69 e 72 segundos, observa-se uma diferença em percentagem compreendida entre 2300 e 2400%. Isto deve-se ao facto de a diferença de temperatura entre a superfície e o meio de arrefecimento ser cada vez menor à medida que o ensaio decorre. O facto de o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para a superfície não variarem de forma significativa com o incremento de diâmetro faz com que o gradiente térmico aumente à medida que se aumenta o diâmetro do modelo computacional.

Na Figura 4.13 encontram-se representadas as variações do  $t_{1/2}$  e do  $t_{7/8}$  com o diâmetro do modelo, para a superfície e arrefecimento a água.

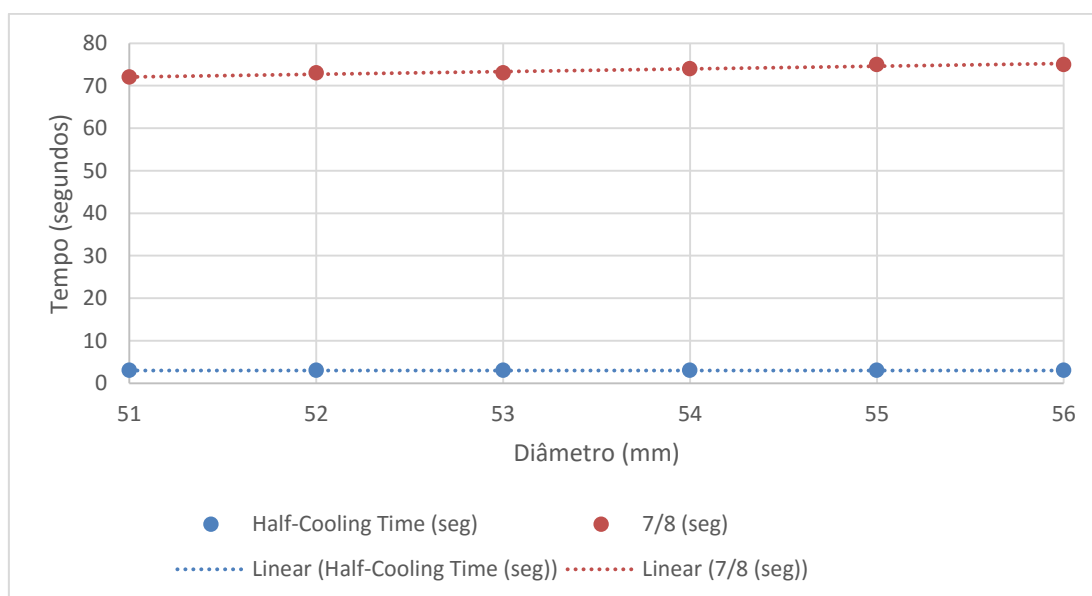


Figura 4.13 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre D, Superfície

Para o arrefecimento a água, calibre D, o Tempo de Meio Arrefecimento em minutos toma o valor de 3 segundos para todos os diâmetros. O instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento pode ser dado pela seguinte correlação:

$$t = 0,629 * \text{Diâmetro} + 40,04$$

Com um  $R^2$  igual a 0,9429.

Exibe-se na Figura 4.14 a variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, para a superfície e para o núcleo, relativa ao diâmetro de 51 mm.

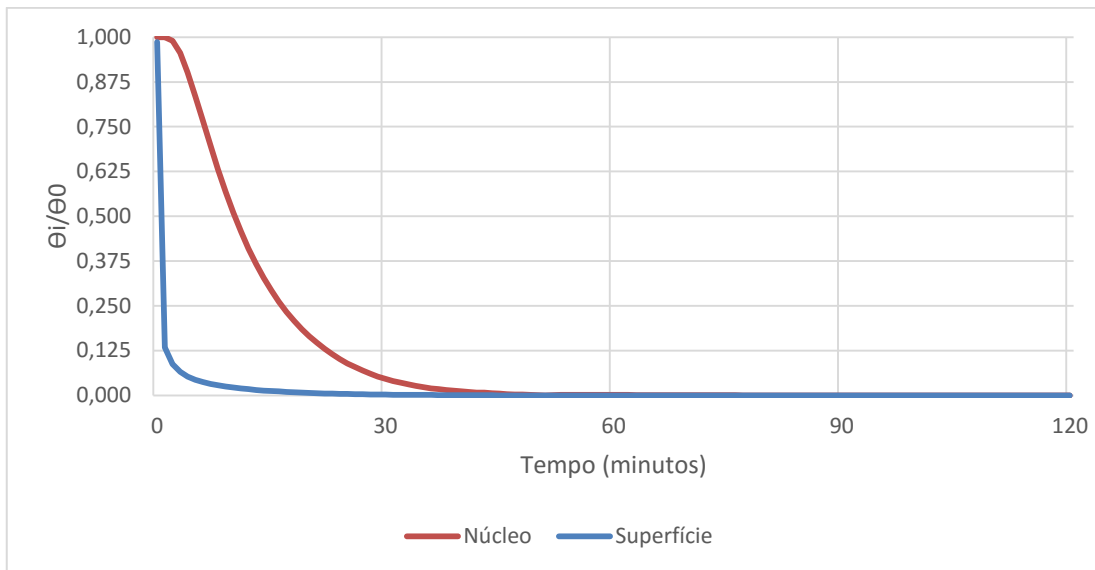


Figura 4.14 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 51 mm, Núcleo e Superfície

O gráfico representado na figura 4.14 ilustra o modo como o gradiente térmico no interior do pêsego evolui ao longo do tempo de ensaio. Embora o gradiente térmico interno seja significativo nos primeiros 30 minutos de ensaio, após a primeira meia hora este tende a anular-se. Estes resultados evidenciam a importância da verificação da temperatura interior para avaliação da qualidade do processo de arrefecimento rápido a que o produto foi sujeito.

Na Tabela 4.12 representam-se os valores obtidos para o Tempo de Meio Arrefecimento relativo ao núcleo e superfície. É também indicada a diferença entre estes dois valores em percentagem e em minutos, para os vários diâmetros do calibre D.

Tabela 4.12 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície para os diferentes diâmetros do Calibre D

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
51	10	0,05	99,5	9,95
52	11	0,05	99,6	10,95
53	11	0,05	99,6	10,95
54	12	0,05	99,6	11,95
55	12	0,05	99,6	11,95
56	13	0,05	99,6	12,95

Considerando o diâmetro de 51 mm representado na Figura 4.14, o  $t_{1/2}$  para o núcleo e para a superfície toma os valores de 10 e 0,05 minutos, respectivamente, resultando numa diferença de 99,5% entre estes dois valores. A diferença do Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo para a superfície no diâmetro de 51 mm é mais significativa do que a diferença entre o Tempo de Meio Arrefecimento no núcleo para 51 e 56 mm (aumento de 30,0%, verificando-se uma diferença de 3 minutos), como também do Tempo de Meio Arrefecimento na superfície de 51 para 56 mm (variação de 0%). A diferença entre o  $t_{1/2}$  do núcleo para a superfície tende a aumentar à medida que se incrementa o diâmetro do modelo, tendo o valor de 12,95 minutos para o diâmetro de 56 mm.

Tabela 4.13 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície para os diferentes diâmetros do Calibre D

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
51	22	1,20	94,6	20,8
52	23	1,22	94,7	21,8
53	24	1,22	94,9	22,8
54	25	1,23	95,1	23,8
55	26	1,25	95,3	24,8
56	27	1,25	95,4	25,8

Relativamente ao diâmetro de 51 mm representado na Figura 4.14, o  $t_{7/8}$  para o núcleo e para a superfície é de 22 e 1,20 minutos, respectivamente, resultando numa diferença de -94,6% (20,8 minutos). A diferença do instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo para a superfície no diâmetro de 51 mm é menos significativa do que a diferença entre o tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento no núcleo de 51 para 56 mm (22,7%, 5 minutos), e do que o aumento do tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento da superfície de 51 para 56 mm (4,2%, 0,05 minutos). A diferença entre o  $t_{7/8}$  do núcleo para a superfície tende a aumentar à medida que se incrementa o diâmetro do modelo, havendo uma discrepância de 25,8 minutos entre o instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento verificado para o núcleo e o instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento relativo à superfície, considerando o diâmetro de 56 mm.

#### 4.2.1.6. Comparação Global - Arrefecimento a água

Tal como foi realizado na comparação global para o caso de arrefecimento a ar, exibem-se os resultados obtidos considerando o arrefecimento a água. Com o intuito de realizar uma comparação global de forma a avaliar o efeito do aumento do diâmetro do modelo no tempo de arrefecimento deste, foram considerados os primeiros diâmetros de cada um dos calibres referidos na Tabela 4.1 (51, 56, 61, 67, 73, 80, 90 mm como também o diâmetro de 100 mm). Serão expostos os resultados relativos à variação da temperatura adimensional, como também os valores do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para os vários diâmetros considerados para ambos núcleo e superfície. São referidas as correlações obtidas para o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento de ambos núcleo e superfície para a totalidade dos diâmetros de todos os calibres referidos na Tabela 4.1.

Na Figura 4.15 encontra-se representada a variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, no núcleo, para os vários diâmetros considerados anteriormente.

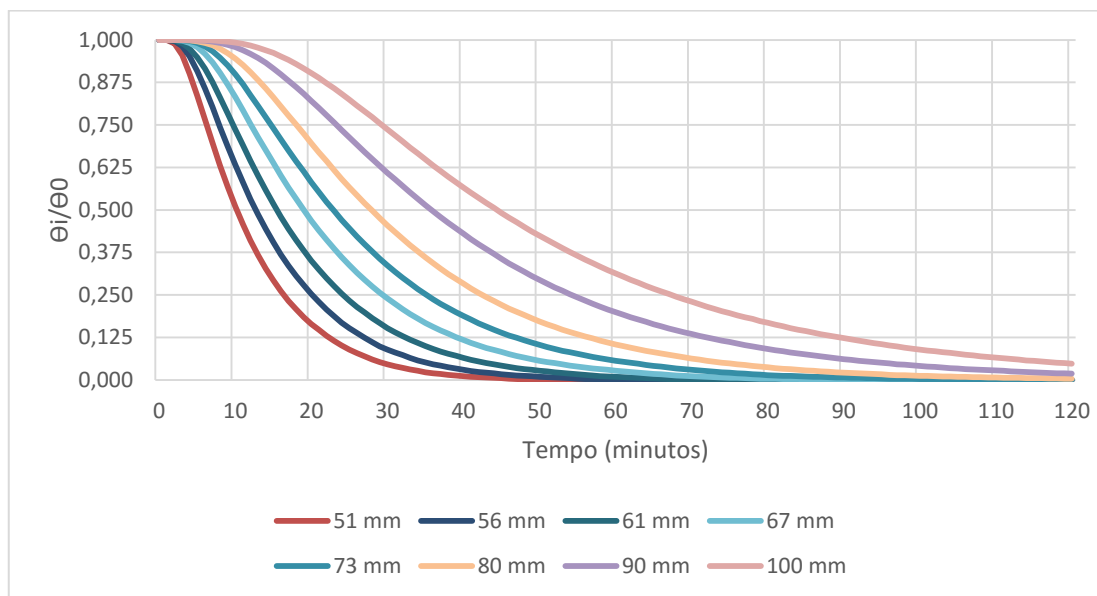


Figura 4.15 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para vários diâmetros, Núcleo

Examinando o gráfico anteriormente representado, é possível observar que o tempo de arrefecimento do modelo aumenta com o incremento do diâmetro deste, verificando-se uma demora progressivamente maior em atingir os instantes de Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento. O atraso inicial verificado no início do processo de arrefecimento também se torna mais elevado à medida que é aumentado o diâmetro do modelo. Para os diâmetros mais elevados do modelo o 1/8 restante da temperatura adimensional demora mais tempo a ser reduzido.

É representada na Figura 4.16 a variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, na superfície, para os vários diâmetros do modelo considerados.

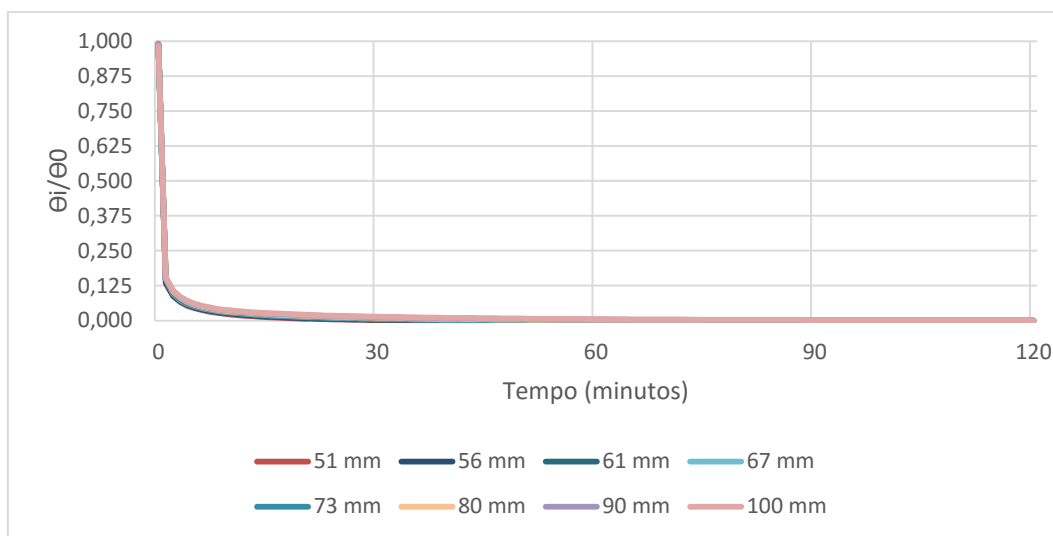


Figura 4.16 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo vários diâmetros, Superfície

A variação da temperatura adimensional ao longo do tempo apresenta um comportamento similar para todos os diâmetros considerados. Devido ao coeficiente convectivo aplicado no modelo computacional, o instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento é atingido nos primeiros minutos de ensaio. Assim, não se verificam diferenças significativas no processo de arrefecimento da superfície dos vários modelos, quando se considera o arrefecimento a água. Na Tabela 4.14 exibe-se o Tempo de Meio Arrefecimento para ambos núcleo e superfície, tal como a diferença entre estes dois valores em percentagem e em minutos.

Tabela 4.14 - Tempo de Meio Arrefecimento para ambos núcleo e superfície, diferença em percentagem e em minutos, para os vários diâmetros considerados, arrefecimento a água

Diâmetro (mm)	t1/2 COMSOL (Núcleo) (min)	t1/2 COMSOL (Superfície) (min)	Diferença entre Núcleo e Superfície (%)	Diferença entre Núcleo e Superfície (min)
51	10	0,05	99,5	9,95
56	13	0,05	99,6	12,95
61	13	0,05	99,6	12,95
67	19	0,05	99,7	18,95
73	23	0,05	99,8	22,95
80	28	0,05	99,8	27,95
90	36	0,05	99,9	35,95
100	44	0,05	99,9	43,95

Analisando os dados representados anteriormente, é possível observar o aumento do gradiente térmico à medida que se incrementa o diâmetro do modelo. O Tempo de Meio Arrefecimento aumenta 4,4 vezes, comparando os valores de  $t_{1/2}$  para o caso particular dos diâmetros de 51 e 100 mm. O  $t_{1/2}$  da superfície tem o valor de 0,05, sendo idêntico para todos os diâmetros considerados. Verifica-se assim, para o caso de arrefecimento a água, a importância de se considerar a temperatura do núcleo, aquando da monitorização da temperatura do pêssego, de forma a que este seja armazenado nas devidas condições.

Na Figura 4.17 encontram-se representados os vários valores do Tempo de Meio Arrefecimento para o núcleo, para a totalidade dos diâmetros considerados (dos 51 aos 100 mm), considerando o arrefecimento a água.

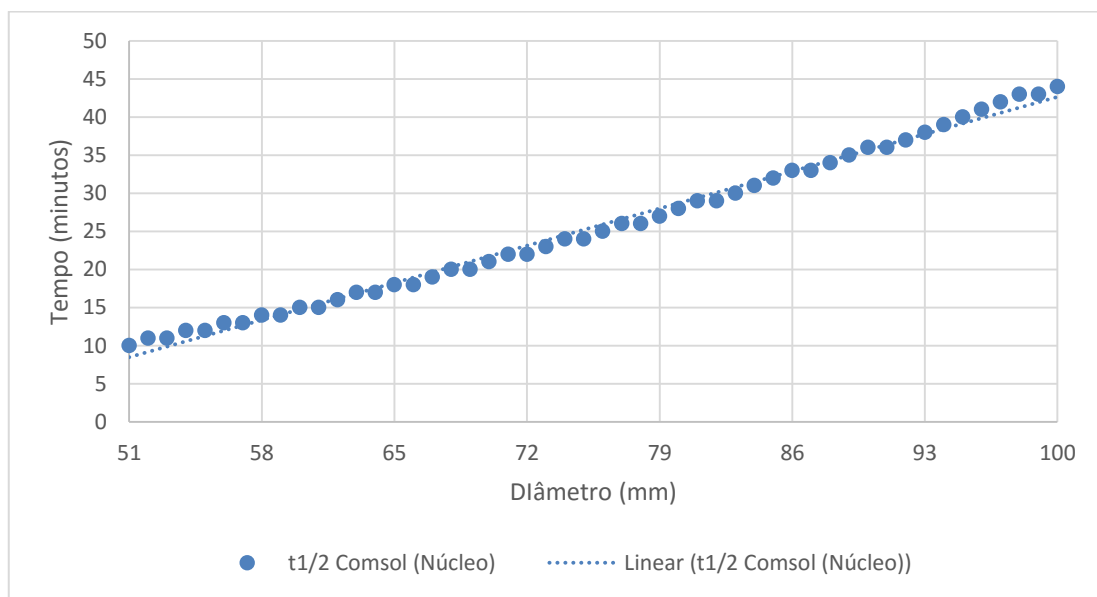


Figura 4.17 - Tempo de Meio Arrefecimento para o Núcleo dos vários diâmetros

Através dos vários valores Tempo de Meio Arrefecimento relativos ao núcleo obteve-se a seguinte correlação, para o qual o  $t_{1/2}$  em minutos em função do diâmetro pode ser dado por:

$$t = 0,697 * \text{Diâmetro} - 27,082$$

Com um  $R^2$  de 0,993.

O elevado valor de  $R^2$  é indicativo de uma correlação consistente entre os valores de Tempo de Meio Arrefecimento obtidos pelo COMSOL e os obtidos pela equação. Para o caso da superfície não foi obtida nenhuma correlação, devido ao facto de o Tempo de Meio Arrefecimento ser igual para todos os diâmetros considerados.

Representa-se na Tabela 4.15 os instantes de tempo para o Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento relativos a ambos núcleo e superfície. Exibe-se também a diferença em percentagem e em minutos para os valores de  $t_{7/8}$  do núcleo e da superfície.

Tabela 4.15 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para ambos núcleo e superfície, diferença em percentagem e em minutos para os vários diâmetros considerados, arrefecimento a água

Diâmetro (mm)	$t_{7/8}$ COMSOL (Núcleo) (min)	$t_{7/8}$ COMSOL (Superfície) (min)	Diferença entre Núcleo e Superfície (%)	Diferença entre Núcleo e Superfície (min)
51	22	1,20	94,5	20,80
56	27	1,25	95,4	25,75
61	32	1,28	96,0	30,72
67	39	1,33	96,6	37,67
73	47	1,37	97,1	45,63
80	56	1,38	97,5	54,62
90	72	1,43	98,0	70,57
100	88	1,45	98,4	86,55

O valor do instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento aumenta à medida que se incrementa o calibre do modelo. O  $t_{7/8}$  para o núcleo aumenta com mais intensidade do que o  $t_{7/8}$  da superfície. Comparando o valor do instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento, para o núcleo, do diâmetro de 100 mm, com o correspondente ao diâmetro de 51 mm, verifica-se que este aumenta 4 vezes. O valor do Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para a superfície aumenta somente 1,2 vezes. O gradiente térmico é mais pronunciado para os diâmetros maiores, demorando mais tempo também para o núcleo e superfície entrarem em equilíbrio térmico.

Na Figura 4.18 encontra-se representada a variação do  $t_{7/8}$  de ambos núcleo e superfície, para ambos núcleos e superfície, em função do diâmetro. Exibem-se também as correlações obtidas para o instante de tempo de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para ambos núcleo e superfície.

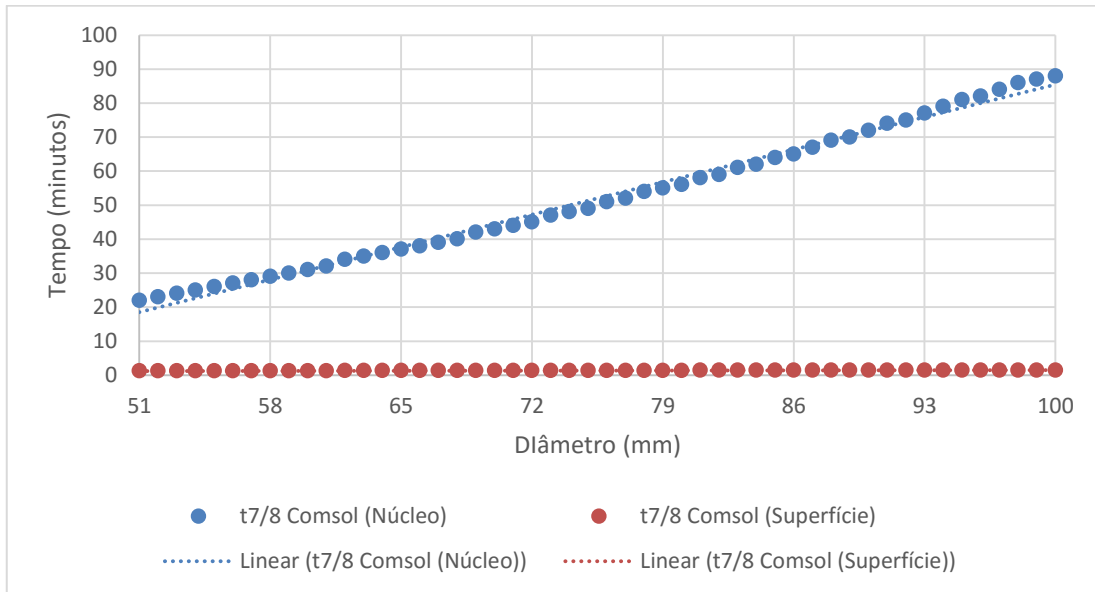


Figura 4.18 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para o Núcleo e Superfície dos vários diâmetros

No caso do arrefecimento a água, globalmente, o Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para o núcleo em minutos, em função do diâmetro pode ser dado pela seguinte correlação:

$$t = 1,366 * Diâmetro - 51,111$$

Com um  $R^2$  igual a 0,992

O Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento, para a superfície, em minutos pode ser dado pela seguinte correlação:

$$t = 0,005 * Diâmetro - 0,983$$

Com um  $R^2$  igual a 0,961.

Um  $R^2$  elevado indica uma forte correlação entre os valores de Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos pela equação, comparativamente aos obtidos pelo COMSOL.

#### 4.2.2. Efeito da variação da temperatura de entrada

Com o objetivo de ser estudado o efeito da temperatura de entrada dos pêssegos nos sistemas de arrefecimento rápido, para ambos os arrefecimentos, a ar e a água, variou-se no COMSOL a temperatura de entrada dos modelos de acordo com temperaturas típicas da época de colheita do modelo (entre 20 e 35°C, simulando colheita feita de manhã e ao final do dia). Serão apresentados os resultados obtidos para os valores de Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para o núcleo e superfície, como também a variação da temperatura ao longo do tempo para as várias temperaturas de entrada consideradas, para o caso do arrefecimento a ar e água, e o gradiente térmico desenvolvido.

##### 4.2.2.1. Arrefecimento a ar

Tendo em conta os parâmetros utilizados para a validação do modelo numérico, consideraram-se as condições de ensaio representadas na Tabela 4.16. A gama de temperaturas de entrada é compreendida entre os 20 e 35°C, em intervalos de 2,5°C. Foi selecionado um tempo de ensaio de 480 minutos de forma a ser possível determinar o tempo adicional que os modelos com temperatura de entrada de 35°C têm de permanecer no sistema de arrefecimento, em comparação com os modelos com temperatura de entrada de 20°C (para uma duração de ensaio de 360 minutos, equivalente ao ensaio de arrefecimento a ar experimental). Desta forma, os gráficos representados ao longo deste estudo de variação da temperatura de entrada só apresentam dados de temperatura em função do tempo até aos 360 minutos, embora tenham sido obtidos dados até aos 480 minutos.

Tabela 4.16 - Condições de ensaio para o arrefecimento a ar

Coefficiente convectivo (W/m <sup>2</sup> K)	Diâmetro [mm]	Temperatura do fluido [K]	Duração do ensaio (min)
6	64,6	274,7	480

Na Figura 4.19 exibe-se a variação da temperatura adimensional no núcleo, para as várias temperaturas iniciais consideradas.

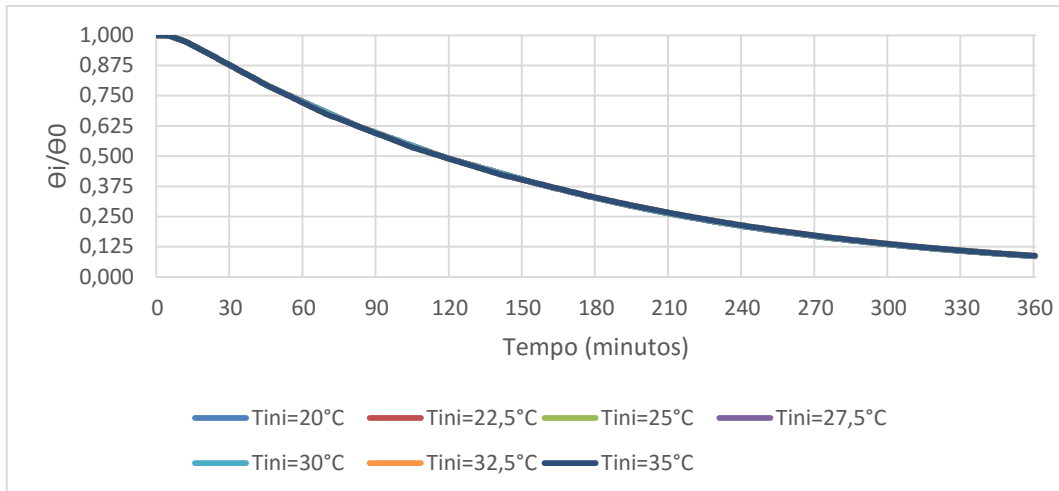


Figura 4.19 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Núcleo

Comparando o decaimento de temperatura na forma adimensional, para o núcleo, representado na Figura 4.19, entre as várias temperaturas iniciais, é possível concluir que a variação da temperatura adimensional apresenta o mesmo comportamento para as várias  $T_i$  consideradas. Desta forma, os valores de Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento não são dependentes da temperatura inicial dos modelos aquando a sua entrada no sistema de arrefecimento. Na Tabela 4.17 apresentam-se os valores para os instantes de tempo de Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos no COMSOL para as várias temperaturas de entrada consideradas, estando também representada a sua diferença em percentagem e em minutos.

Tabela 4.17 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo

Tinicial °C	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
20,0	116	310	167,3	194
22,5	116	310	167,3	194
25,0	116	310	167,3	194
27,5	116	310	167,3	194
30,0	116	310	167,3	194
32,5	116	312	169,0	196
35,0	116	312	169,0	196

Através da análise dos resultados expostos na Tabela 4.17 conclui-se que o  $t_{1/2}$  é idêntico para todas as temperaturas de entrada consideradas, para os parâmetros escolhidos, tendo o valor de 116 minutos. O Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento ocorre aos 310 minutos, existe uma diferença de 2 minutos para o  $t_{7/8}$  entre a  $T_i$  de 30 e 32,5°C. A diferença em percentagem para os valores de  $t_{1/2}$  e  $t_{7/8}$  varia entre 167,2 e 169,0%, existindo uma diferença de 194 a 196 minutos entre o  $t_{1/2}$  e  $t_{7/8}$ .

Na Figura 4.20 está representada a variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, na superfície para as várias temperaturas de entrada consideradas.

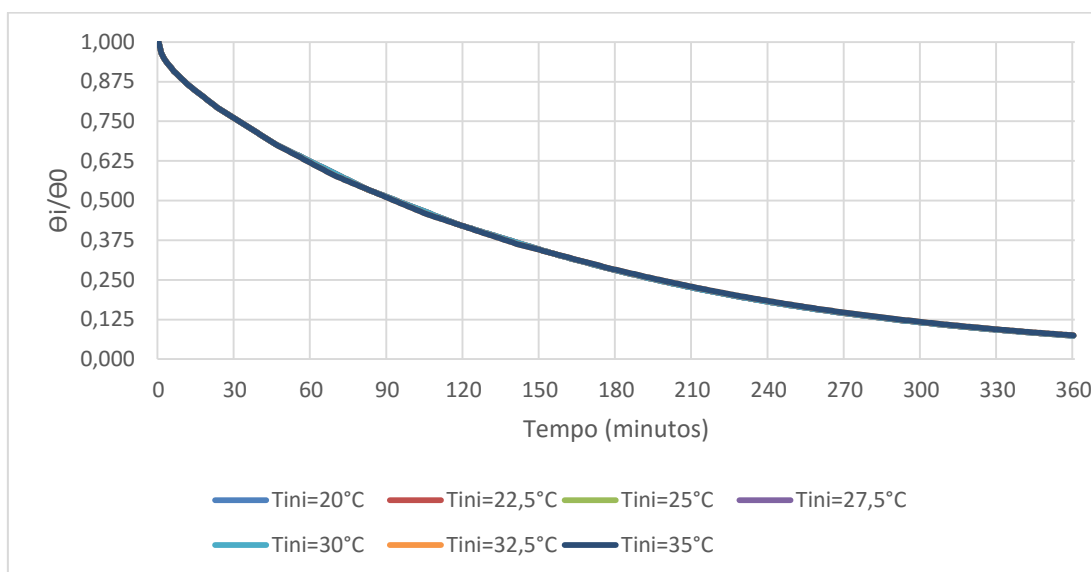


Figura 4.20 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Superfície

Na variação da temperatura adimensional na superfície, representada na Figura 4.20, verifica-se que as curvas possuem um comportamento semelhante ao que foi verificado anteriormente no caso do arrefecimento no núcleo, representado na Figura 4.19. Assim, também o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento apresentam valores idênticos para as várias temperaturas de entrada escolhidas para a parametrização efetuada. O comportamento da curva de variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para os primeiros minutos demonstra que o arrefecimento na superfície se dá de forma mais abrupta, em comparação com o arrefecimento no núcleo representado na Figura 4.19, onde é possível ver que a temperatura apresenta um decaimento moroso nos primeiros minutos.

Na Tabela 4.18 estão indicados os valores de instante de tempo relativos ao Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos diretamente a partir do COMSOL, para as várias temperaturas de entrada consideradas, no caso do arrefecimento na superfície.

Tabela 4.18 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície

Tinicial °C	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	7/8 (min)	Δ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	Δ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
20,0	94	290	208,5	196
22,5	94	290	208,5	196
25,0	94	290	208,5	196
27,5	94	290	208,5	196
30,0	94	290	208,5	196
32,5	93	292	214,0	199
35,0	93	292	214,0	199

O Tempo de Meio Arrefecimento para a superfície varia entre os 93 e 94 minutos, existindo uma diferença de 21 a 22 minutos entre o  $t_{1/2}$  obtido para a superfície e o  $t_{1/2}$  obtido para o núcleo. O Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento varia entre 290 e 292 minutos, verificando-se uma diferença de 20 minutos entre o  $t_{7/8}$  superfície e o  $t_{7/8}$  do núcleo. A diferença em minutos entre o valor de Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento apresenta valores semelhantes para o núcleo e para a superfície, verificando-se uma diferença entre 2 e 3 minutos.

Na Figura 4.21 encontra-se representada a variação da temperatura do modelo ao longo do tempo para as várias  $T_i$  consideradas.

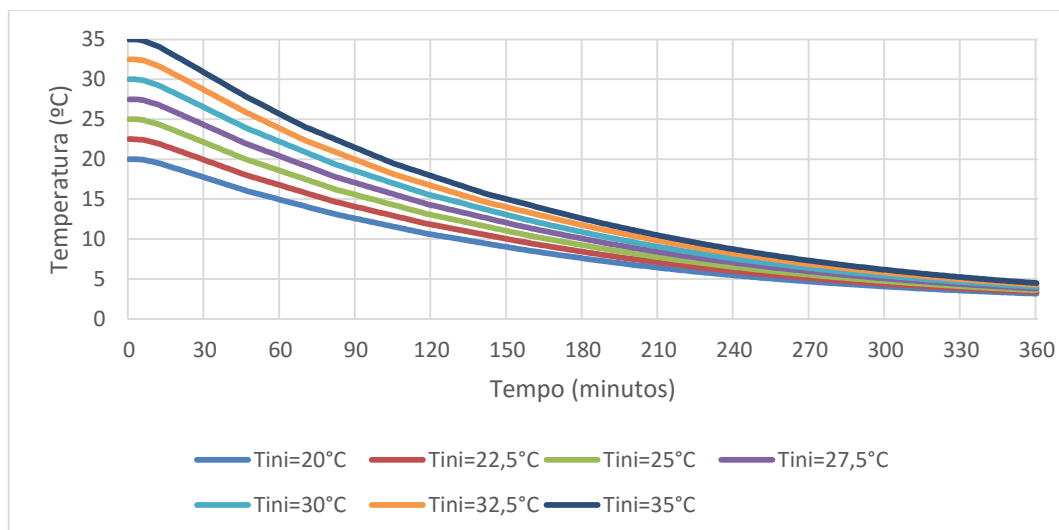


Figura 4.21 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Núcleo

Analisando a variação da temperatura do modelo ao longo do tempo para as diferentes temperaturas de entrada consideradas, conclui-se que o tempo de permanência do modelo no sistema de arrefecimento rápido, em função da temperatura de entrada, é um fator essencial que deve ser fortemente considerado. Embora para o tempo de ensaio considerado de 360 minutos a temperatura de entrada do modelo tenha pouco impacto (diferença de 1,3°C na temperatura final ao fim de 6 horas de permanência, comparando as temperaturas de entrada de 20 e 35°C), para permanências no meio de arrefecimento menos extensas (até 1 ou 2 horas) a temperatura inicial é um fator relevante na capacidade de arrefecer e preservar com sucesso o pêsego, existindo diferenças de temperatura consideráveis entre os pêsegos com temperaturas mais elevadas, em comparação com pêsegos que tenham sido colhidos a uma temperatura mais reduzida.

Na Tabela 4.19 estão representados os valores de temperatura no núcleo do modelo para os instantes de tempo de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 h, para cada uma das temperaturas de entrada consideradas no ensaio.

Tabela 4.19 - Temperatura em intervalos de 1 hora para os vários valores de  $T_i$ , Núcleo

$T_i$ °C	Tempo (horas)					
	1	2	3	4	5	6
	T°C	T°C	T°C	T°C	T°C	T°C
20,0	14,8	10,7	7,9	5,8	4,3	3,3
22,5	16,6	11,9	8,6	6,4	4,7	3,6
25,0	18,5	13,2	9,5	6,9	5,1	3,8
27,5	20,3	14,4	10,3	7,5	5,5	4,1
30,0	22,1	15,6	11,2	8,1	5,8	4,3
32,5	23,9	16,9	12,0	8,7	6,2	4,5
35,0	25,7	17,8	12,1	8,3	5,8	4,2
$\Delta$ 35 e 20	10,8	7,1	4,2	2,5	1,6	1,0

Comparando a variação da temperatura ao final da primeira hora entre as temperaturas de entrada de 20 e 35°C, observa-se uma maior taxa de arrefecimento no modelo com a temperatura de entrada mais elevada (redução de 9,3°C para  $T_i$  35°C relativamente aos 5,2°C verificados para a  $T_i$  20°C). Os modelos com temperatura de entrada de 35°C apresentam um decréscimo de temperatura de 9,3°C na primeira hora, havendo uma redução de 26,6% da temperatura inicial, face aos 5,1°C para os modelos com temperatura de entrada de 20 °C, que apresentam um decréscimo de 26%, isto deve-se à maior diferença de temperatura entre o modelo e o fluido de arrefecimento, dando-se uma maior transmissão de calor da fruta para o meio.

Para que os modelos com temperatura de entrada de 35°C atinjam os 20°C estes têm de ser arrefecidos durante 101 minutos. Já para atingir os 14,8°C, este tem de ser arrefecido durante 148 minutos, sendo necessária uma permanência adicional de 89 minutos no sistema de arrefecimento face aos modelos com uma temperatura de entrada de 20 °C. Para os restantes instantes de tempo considerados de 2, 3, 4, 5 e 6h, o tempo de permanência adicional para os modelos de temperatura de entrada de 35°C, relativamente aos modelos com  $T_i$  de 20°C é de 79, 68, 62, 59 e 58 minutos, respetivamente.

Na Figura 4.22 está representada a variação da temperatura na superfície do modelo ao longo do tempo para as diferentes temperaturas de entrada consideradas.

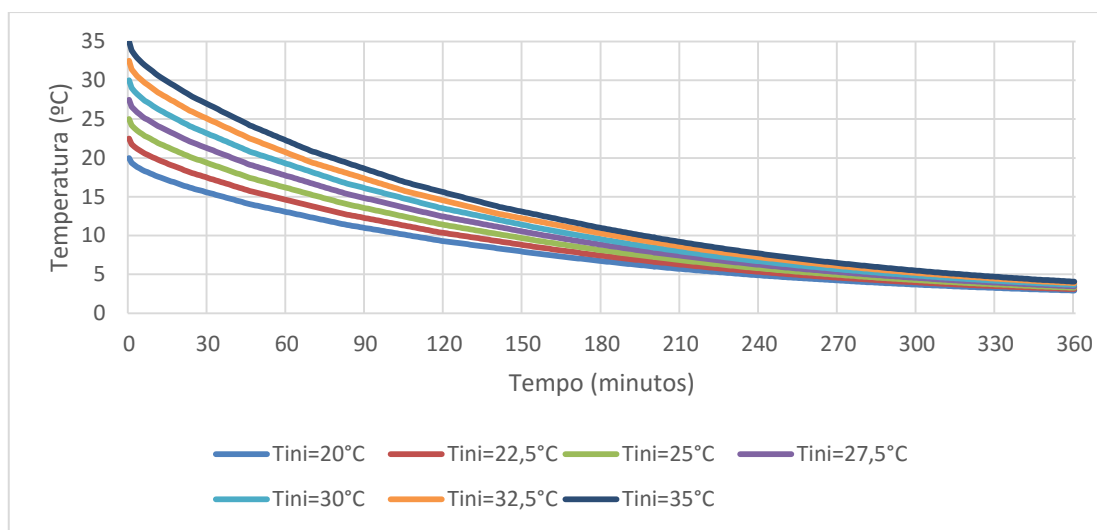


Figura 4.22 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Superfície

Comparando o decaimento inicial da variação da temperatura ao longo do tempo com os resultados presentes na Figura 4.21, é possível concluir que o decréscimo de temperatura na superfície se dá de forma mais acentuada do que no núcleo. Contrariamente ao que se observou para a variação da temperatura adimensional no núcleo, onde é possível verificar um atraso da resposta térmica nos instantes iniciais, a temperatura à superfície desce desde o início do ensaio, e de forma mais abrupta, como se verificou na variação da temperatura adimensional na superfície. Embora este decréscimo de temperatura seja mais elevado em comparação com o arrefecimento no núcleo, não se produz um gradiente térmico significativo entre estes no caso particular do arrefecimento a ar. No caso de arrefecimento na superfície, para o tempo de ensaio escolhido (360 minutos), os efeitos de uma maior temperatura inicial também se atenuam ao longo do decorrer do processo de arrefecimento, havendo uma diferença de 0,8°C entre as temperaturas de entrada de 20 e 35°C ao final das 6 horas. A diferença em graus entre as várias  $T_i$  é menor para cada incremento de 1 hora de permanência no sistema de arrefecimento, em comparação à

variação da temperatura no núcleo. Na Tabela 4.20 exibem-se os valores de temperatura na superfície do modelo para os instantes de tempo de 1, 2, 3, 4, 5 e 6h, para as diferentes  $T_i$  consideradas.

Tabela 4.20 - Temperatura em intervalos de 1 hora para os vários valores de temperatura inicial, Superfície

T <sub>inicial</sub> °C	Tempo (horas)					
	1	2	3	4	5	6
	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)
20,0	13,0	9,4	7,0	5,2	3,9	3,0
22,5	14,5	10,4	7,6	5,7	4,3	3,3
25,0	16,1	11,5	8,4	6,2	4,6	3,5
27,5	17,6	12,6	9,1	6,7	4,9	3,7
30,0	19,2	13,6	9,8	7,2	5,2	3,9
32,5	20,7	14,7	10,5	7,7	5,6	4,1
35,0	22,3	15,5	10,6	7,3	5,2	3,9
Δ 35 e 20	9,3	6,1	3,6	2,2	1,3	0,8

Os modelos com temperatura de entrada de 20°C apresentam uma redução de 7°C ao fim da primeira hora de arrefecimento. Já os modelos de com  $T_i$  de 35°C sofrem um decréscimo de 13,7°C durante a primeira hora. Isto traduz-se numa redução de 35% para o caso do modelo com temperatura de entrada de 20°C, e numa redução de 36,3% para os modelos com temperatura de entrada de 35°C.

De forma a que os modelos com temperatura de entrada de 35°C atinjam os 20°C, é necessário que decorram 78 minutos. Para os instantes de tempo considerados de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 horas, o tempo de permanência adicional dos modelos com  $T_i$  permanece inalterada em comparação com o tempo de adicional dos modelos no arrefecimento do no núcleo (89, 79, 68, 62, 59, e 58 minutos).

Na Tabela 4.21 representa-se a diferença de temperatura entre o núcleo e a superfície, para as várias temperaturas de entrada, para os vários instantes de tempo considerados.

Tabela 4.21 - Diferença de temperatura entre núcleo e superfície, para as várias  $T_i$  e instantes de tempo

T inicial °C	Tempo (horas)					
	1	2	3	4	5	6
	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)
20,0	1,9	1,3	0,9	0,6	0,4	0,2
22,5	2,1	1,5	1,0	0,7	0,5	0,3
25,0	2,4	1,7	1,1	0,8	0,5	0,3
27,5	2,6	1,8	1,3	0,9	0,6	0,4
30,0	2,9	2,0	1,4	0,9	0,6	0,4
32,5	3,2	2,2	1,5	1,0	0,7	0,4
35,0	3,4	2,3	1,5	1,0	0,6	0,4

Analisando os resultados expostos anteriormente, é possível concluir que a diferença da temperatura entre o núcleo e a superfície tende-se a anular à medida que se prolonga o tempo de arrefecimento. Existe uma maior disparidade entre a temperatura do núcleo e da superfície, para as temperaturas de entrada mais elevadas, nas primeiras horas, devido ao facto de existir uma maior taxa de transmissão de calor da superfície para o meio, como consequência de uma temperatura mais elevada.

#### 4.2.2.2. Arrefecimento a água

A partir dos dados utilizados para validar o modelo numérico, para o caso de arrefecimento a água consideraram-se as condições de ensaio representadas na Tabela 4.22. Também a temperatura de entrada foi variada entre 20 e 35°C, em intervalos de 2,5°C. De forma semelhante ao que foi feito no estudo do efeito da temperatura de entrada no arrefecimento a ar, no estudo do arrefecimento a água foi escolhido um tempo de ensaio de 60 minutos, de forma a ser possível determinar o tempo adicional que os modelos com temperatura de entrada de 35°C têm de permanecer no sistema de arrefecimento, face aos modelos com temperatura de entrada de 20°C (para uma duração de ensaio de 50 minutos, equivalente ao ensaio de arrefecimento a água experimental).

Tabela 4.22 - Condições de ensaio para o arrefecimento a água

Coefficiente convectivo [W/m <sup>2</sup> K]	Diâmetro [mm]	Temperatura do fluido [K]	Duração do ensaio (min)
680	64,6	275	60

Na Figura 4.23 está representada a variação da temperatura adimensional no núcleo ao longo do tempo, para as várias temperaturas de entrada consideradas.

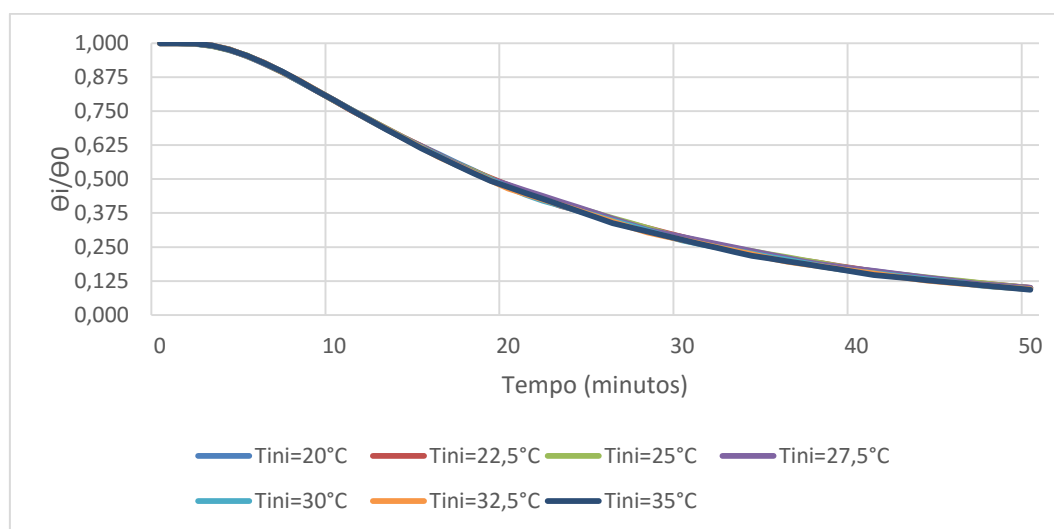


Figura 4.23 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Núcleo

Também para o caso de arrefecimento a água é possível concluir que a variação da temperatura adimensional é independente da temperatura de entrada da fruta no sistema de arrefecimento. A variação da temperatura adimensional no núcleo exibe um ligeiro atraso nos primeiros minutos, apresentando de seguida um rápido decaimento. O arrefecimento a água é bastante mais rápido do que o arrefecimento a ar. Na Figura 4.23, e posteriormente na Tabela 4.23 é possível observar que é atingido o Tempo de Meio Arrefecimento aos 19 minutos, quando que para o arrefecimento a ar este só era atingido aos 116 minutos. Na Tabela 4.23 encontram-se representados os valores de Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos para as várias temperaturas de entrada, assim como a diferença entre  $t_{1/2}$  e  $t_{7/8}$  em percentagem e em minutos.

Tabela 4.23 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo

Tinicial °C	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	Δ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	Δ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
20,0	19	45	136,8	26,0
22,5	19	46	142,1	27,0
25,0	19	46	142,1	27,0
27,5	19	46	142,1	27,0
30,0	19	45	136,8	26,0
32,5	19	44	131,6	25,0
35,0	19	45	136,8	26,0

A partir dos resultados observados na Tabela 4.23 conclui-se que, para a parametrização exposta na Tabela 4.22, o Tempo de Meio Arrefecimento ocorre aos 19 minutos e o Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento entre os 44 e 46 minutos, no caso de arrefecimento a água. A diferença entre estes dois valores é inferior para o caso do arrefecimento a água do que no arrefecimento a ar (entre 131,6 e 142,1% em comparação com os 167,3 e 169,0%, e 19 minutos em comparação com os 194 minutos).

Representa-se na Figura 4.24 a variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, para a superfície, para as temperaturas de entrada consideradas.

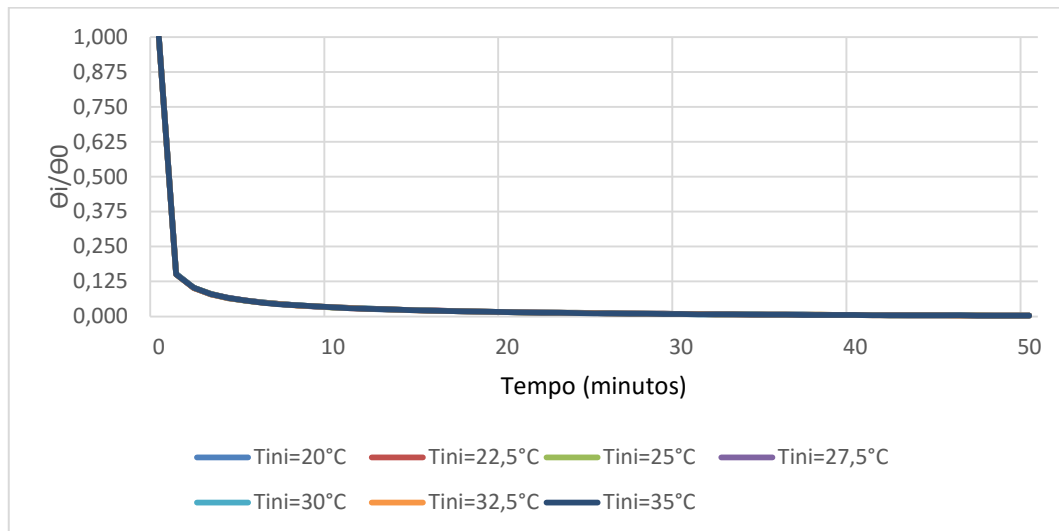


Figura 4.24 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Superfície

Analisando a variação da temperatura representada na Figura 4.24, é possível concluir que para o arrefecimento a água, devido ao coeficiente convectivo utilizado, a maior redução da temperatura da superfície ocorre nos primeiros minutos. Esta disparidade de temperatura entre o núcleo e a superfície dá origem a um gradiente térmico acentuado. Este gradiente térmico é superior no caso do arrefecimento a água em comparação com o arrefecimento a ar. Tal diferença de temperatura entre o núcleo e a superfície realça a importância de considerar a temperatura no interior do modelo aquando do seu armazenamento.

Na Tabela 4.24 representam-se os valores obtidos para o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL e a diferença entre estes valores em percentagem e em minutos, para o caso de arrefecimento da superfície.

Tabela 4.24 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície

Tinicial °C	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	7/8 (min)	Δ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	Δ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
20,0	0,05	1,30	2500,0	1,25
22,5	0,05	1,22	2333,3	1,17
25,0	0,05	1,20	2300,0	1,15
27,5	0,05	1,20	2300,0	1,15
30,0	0,05	1,20	2300,0	1,15
32,5	0,05	1,20	2300,0	1,15
35,0	0,05	1,18	2266,7	1,13

Através da análise dos valores obtidos para os instantes de tempo de  $t_{1/2}$  e  $t_{7/8}$ , e posterior comparação com os valores obtidos na Tabela 4.23, é possível verificar o elevado gradiente térmico referido anteriormente. Quando o Tempo de Meio Arrefecimento é atingido ao fim de 0,05 minutos (3 segundos), verifica-se, na prática, uma diferença de 19 minutos entre o Tempo de Meio Arrefecimento obtido para o núcleo e para a superfície, e uma diferença de 43 a 45 minutos entre o Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento para o núcleo e a superfície. Embora a temperatura apresente um decaimento rápido na superfície (atingindo o Tempo de Meio Arrefecimento aos 0,05 minutos e o Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento entre os 1,18 e os 1,30 minutos), a diferença em percentagem entre o  $t_{1/2}$  e  $t_{7/8}$  apresenta um valor compreendido entre os 2266,7 e os 2500%.

Na Figura 4.25 representa-se a variação da temperatura no núcleo ao longo do tempo, para as várias temperaturas de entrada consideradas.

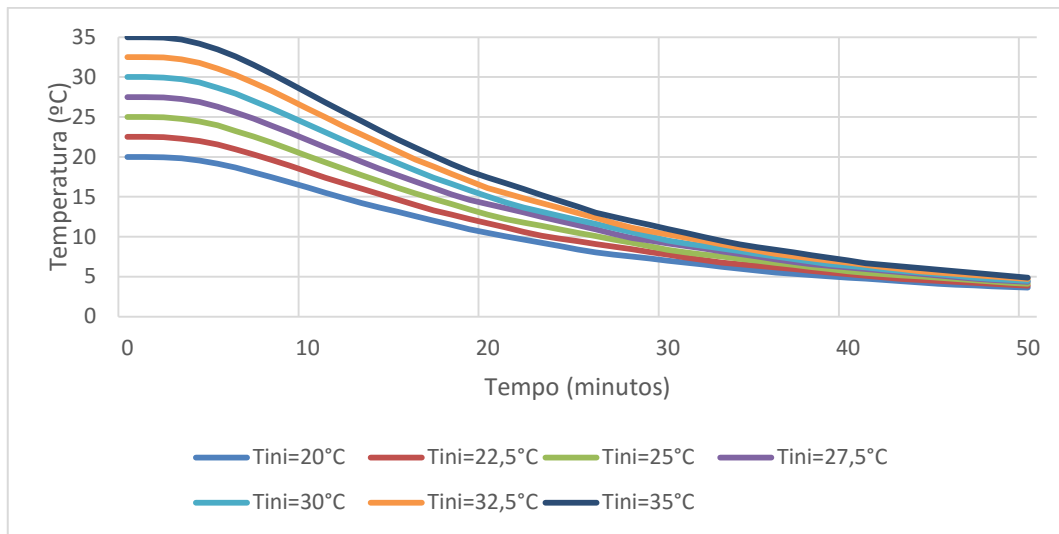


Figura 4.25 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Núcleo

A variação da temperatura ao longo do tempo, no caso do arrefecimento a água, também apresenta um ligeiro atraso nos primeiros minutos, em comparação com o arrefecimento do núcleo quando sujeito a arrefecimento a ar. Após os primeiros minutos de atraso, o arrefecimento no núcleo dá-se de forma rápida (comparativamente ao arrefecimento a ar).

Estão expostos na Tabela 4.25 os valores de temperatura no núcleo do modelo para os instantes de tempo de 10, 20, 30, 40 e 50 minutos, para as  $T_i$  consideradas.

Tabela 4.25 - Temperatura em intervalos de 10 minutos para os vários valores de temperatura inicial, Núcleo

T <sub>inicial</sub> °C	Tempo (minutos)				
	10	20	30	40	50
20,0	16,2	10,5	7,0	4,9	3,6
22,5	18,1	11,7	7,7	5,3	3,9
25,0	20,1	12,8	8,4	5,7	4,1
27,5	22,1	14,1	9,2	6,2	4,4
30,0	24,1	15,1	9,5	6,3	4,5
32,5	26,1	16,1	10,3	6,7	4,7
35,0	28,0	17,4	11,0	7,0	4,9
$\Delta$ 35 e 20	11,8	7,0	4,0	2,1	1,3

Após 10 minutos de ensaio no COMSOL, os modelos com temperatura de entrada de 20°C atingem os 16,2°C, ou seja, uma redução de 4,8°C. Os modelos com temperatura de entrada de 35°C apresentam um decréscimo de 7°C, atingindo os 28°C. Ao fim da primeira hora de ensaio no COMSOL, para o caso de arrefecimento a ar, os modelos de 20 e 35°C atingiam as temperaturas de 14,8 e 25,7°C, respetivamente. Os modelos com  $T_i$  de 20 e 35°C sujeitos ao arrefecimento a água, conseguem ter a sua temperatura reduzida para os 14,8 e 25,7°C referidos anteriormente, respetivamente, ao fim de 12 minutos. Os modelos com temperatura de entrada de 35°C atingem os 16,2°C ao fim de 22 minutos, ou seja, após 12 minutos adicionais de arrefecimento. Para os restantes instantes de tempo considerados de 20, 30, 40 e 50 minutos, o tempo de permanência adicional para os modelos de temperatura de entrada de 35°C, relativamente aos modelos com  $T_i$  de 20°C é de 11 (para os 20 minutos) e 10 minutos (para os restantes).

Na Figura 4.26 encontra-se representada a variação da temperatura da superfície ao longo do tempo, para as várias temperaturas de entrada consideradas.

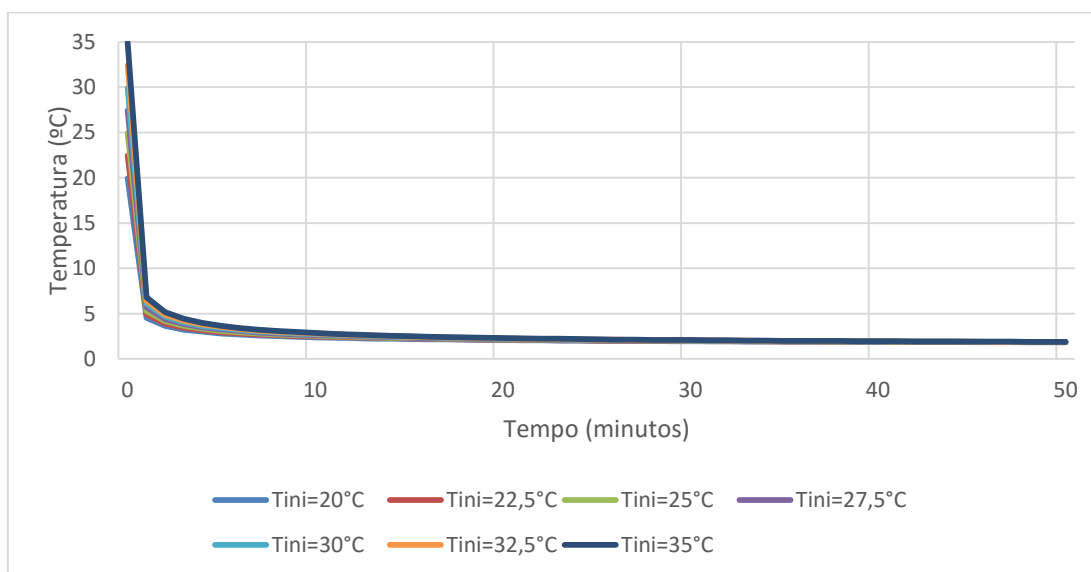


Figura 4.26 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Superfície

A temperatura na superfície sofre uma redução abrupta nos primeiros minutos de ensaio. Esta variação brusca na temperatura da superfície não produz nenhum atraso no processo de arrefecimento, tal como no processo de arrefecimento a ar. A partir dos 10 minutos deixa de ser relevante o efeito da temperatura de entrada, na variação da temperatura na superfície.

Na Tabela 4.26 representam-se os valores obtidos através do COMSOL para a variação da temperatura na superfície para os instantes de tempo de 10, 20, 30, 40 e 50 minutos.

Tabela 4.26 - Temperatura em intervalos de 10 minutos para os vários valores de temperatura de temperatura inicial, Superfície

T <sub>inicial</sub> °C	Tempo (minutos)				
	10	20	30	40	50
20,0	2,4	2,1	2,0	1,9	1,9
22,5	2,5	2,1	2,0	1,9	1,9
25,0	2,5	2,2	2,0	1,9	1,9
27,5	2,6	2,2	2,0	1,9	1,9
30,0	2,7	2,2	2,0	1,9	1,9
32,5	2,8	2,3	2,1	1,9	1,9
35,0	2,9	2,3	2,1	2,0	1,9
$\Delta$ 35 e 20	0,5	0,2	0,1	0,1	0,0

A partir dos dados apresentados anteriormente é possível observar o efeito do elevado coeficiente convectivo na variação da temperatura da superfície do modelo. Após os primeiros 10 minutos de ensaio, os modelos com temperatura de entrada de 20°C têm a temperatura da sua superfície reduzida até aos 2,9°C e os modelos com temperatura de entrada de 35°C arrefecem até aos 2,4°C. Aos 50 minutos deixam de existir diferenças de temperatura entre as várias temperaturas de entrada consideradas. Na Tabela 4.27 expõe-se a diferença de temperatura entre o núcleo e a superfície, no caso de arrefecimento a água, para as várias temperaturas de entrada consideradas, de 10 em 10 minutos, até aos 50 minutos de ensaio.

Tabela 4.27 - Diferença de temperatura entre núcleo e superfície, para as várias T<sub>i</sub> e instantes de tempo

T <sub>inicial</sub> °C	Tempo (minutos)				
	10	20	30	40	50
	T°C	T°C	T°C	T°C	T°C
20,0	13,8	8,4	5,1	3,0	1,8
22,5	15,7	9,6	5,8	3,4	2,0
25,0	17,6	10,6	6,4	3,8	2,2
27,5	19,5	11,9	7,1	4,2	2,5
30,0	21,4	12,8	7,5	4,4	2,6
32,5	23,2	13,8	8,2	4,8	2,8
35,0	25,1	15,1	8,9	5,1	3,0

Devido à rapidez com que a superfície transfere calor para o meio de arrefecimento, dá-se origem a um gradiente térmico no modelo. Este gradiente é tanto maior quanto o for a temperatura de entrada. Embora a diferença de temperatura entre o núcleo e a superfície tenha tendência a se anular com o decorrer do tempo, mesmo após terem decorrido os 50 minutos de ensaio, os modelos com temperatura de entrada de 35°C ainda apresentam uma diferença de temperatura de 3°C entre a superfície e o núcleo. De forma a os modelos com temperatura de entrada de 35°C terem uma diferença de temperatura de 0,4°C (como no caso de arrefecimento a ar), é necessário que decorram 88 minutos (sendo 4,1 vezes mais rápida do que no arrefecimento a ar, para o caso particular da  $T_i$  de 35°C).

### **4.2.3. Efeito da variação da temperatura do fluido de arrefecimento**

#### **4.2.3.1. Arrefecimento a ar**

De forma a caracterizar o comportamento térmico do modelo através da variação da temperatura do ar, utilizaram-se os parâmetros considerados na Tabela 4.28. Estes parâmetros foram selecionados tendo por base a parametrização feita para a validação do modelo numérico. A temperatura do fluido de arrefecimento (ar) foi variada entre 0 e 3°C, em intervalos de 0,5°C. Foi escolhido um tempo de ensaio de 600 minutos, de forma a determinar o tempo adicional que os modelos arrefecidos com uma  $T_{\infty}$  de 3°C têm de permanecer no sistema de arrefecimento, face aos modelos arrefecidos com  $T_{\infty}$  de 0°C (para uma duração de ensaio de 360 minutos, equivalente ao ensaio de arrefecimento a ar experimental).

Tabela 4.28 - Condições de ensaio para o arrefecimento a ar

Coeficiente convectivo [W/m <sup>2</sup> K]	Diâmetro [mm]	Temperatura inicial [K]	Duração do ensaio [min]
6	64,6	294,3	360

Na Figura 4.27 encontra-se exposta a variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, para as várias temperaturas do fluido de arrefecimento consideradas.

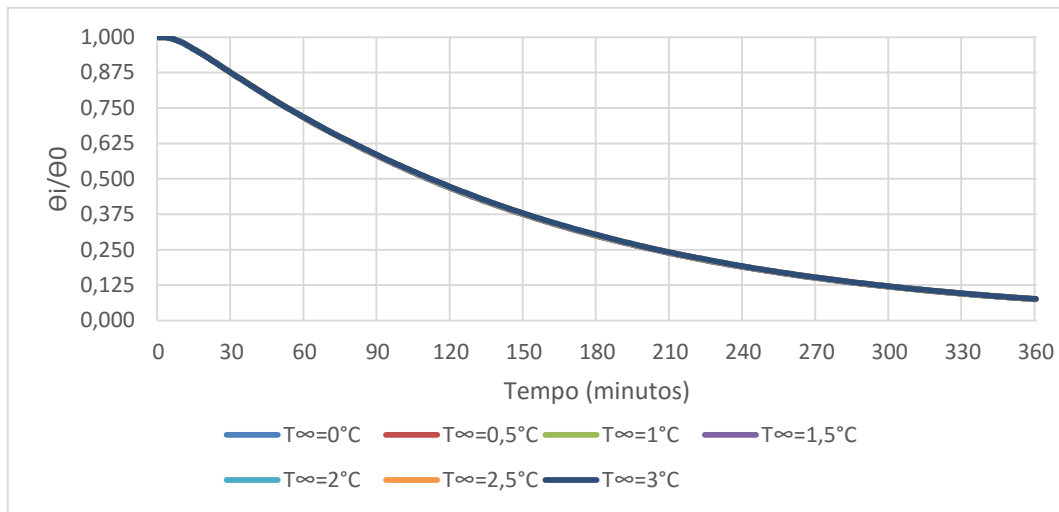


Figura 4.27 - Variação da temperatura adimensional ao longo tempo, Núcleo

A variação da temperatura adimensional ao longo do tempo apresenta um comportamento semelhante ao que foi verificado na Figura 4.19, para o caso do estudo do efeito da temperatura de entrada do modelo, quando sujeito ao arrefecimento a ar. Também no estudo do efeito da temperatura do fluido de arrefecimento não se verificam diferenças entre as várias curvas da variação da temperatura adimensional. Assim, os valores de Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento não são dependentes da temperatura do fluido de arrefecimento. Verifica-se também um ligeiro atraso no arrefecimento nos primeiros instantes. Na Tabela 4.29 expõe-se os resultados obtidos para o valor do Tempo de Meio Arrefecimento, Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento, e a diferença entre estes valores em percentagem e minutos, para o núcleo, quando sujeito a várias temperaturas de fluido de arrefecimento (ar).

Tabela 4.29 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo

$T_{\infty}$ °C	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
0,0	111	294	164,9	183
0,5	111	294	164,9	183
1,0	111	295	165,8	184
1,5	111	295	165,8	184
2,0	112	295	163,4	183
2,5	112	296	164,3	184
3,0	111	294	164,9	183

Para a parametrização descrita na Tabela 4.28, o Tempo de Meio Arrefecimento obtido varia entre 111 e 112 minutos, e o Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento varia entre 294 e 295 minutos, para o arrefecimento a ar. Existe uma diferença entre o  $t_{1/2}$  e  $t_{7/8}$  compreendida entre os 183 e os 184 minutos, ou seja, verifica-se um aumento de tempo entre os 164,3 e os 165,8%, para após se alcançar o Tempo de Meio Arrefecimento ser possível atingir o Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento.

Na Figura 4.28 encontra-se representada a variação da temperatura adimensional ao longo do tempo na superfície, para as várias temperaturas de fluido de arrefecimento consideradas.

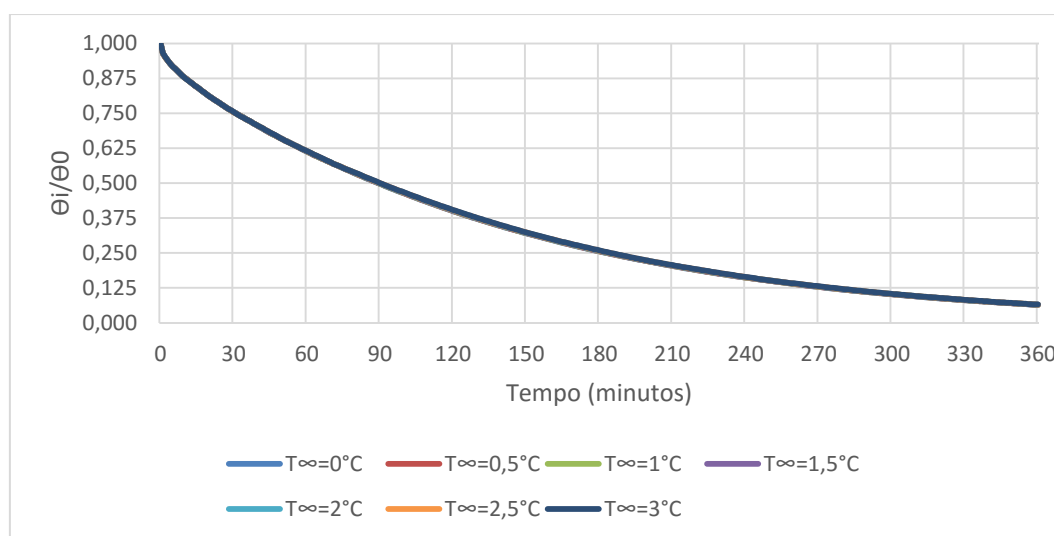


Figura 4.28 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Superfície

Na variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, para o caso da superfície, não se verifica qualquer atraso no processo de arrefecimento. É possível observar que a temperatura começa a decair logo desde o primeiro instante. Também o comportamento da curva de variação da temperatura adimensional é independente da temperatura do fluido escolhida.

Na Tabela 4.30 apresentam-se os valores para os instantes de tempo de Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL para as várias temperaturas de entrada consideradas. Representa-se também a diferença entre o Tempo de Meio Arrefecimento em percentagem e em minutos.

Tabela 4.30 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície

$T_{\infty}$ °C	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	7/8 (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
0,0	89	274	207,9	185
0,5	89	274	207,9	185
1,0	89	274	207,9	185
1,5	90	275	205,6	185
2,0	90	275	205,6	185
2,5	90	275	205,6	185
3,0	90	276	206,7	186

Na variação da temperatura adimensional da superfície, o  $t_{1/2}$  varia entre os 89 e 90 minutos, e o  $t_{7/8}$  varia entre os 274 e os 276 minutos. Esta diferença entre o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento é compreendida entre 185 e 186 minutos, variando entre os 205,6 e os 207,9%. Embora ambos  $t_{1/2}$  e  $t_{7/8}$  ocorram mais cedo do que o que se verificou para o caso de arrefecimento no núcleo, a diferença entre eles mantém-se sensivelmente igual (185 minutos para a superfície e 183 a 184 minutos para o núcleo).

Na Figura 4.29 encontra-se representada a variação da temperatura ao longo do tempo, para o núcleo, para as várias temperaturas de  $T_{\infty}$  consideradas.

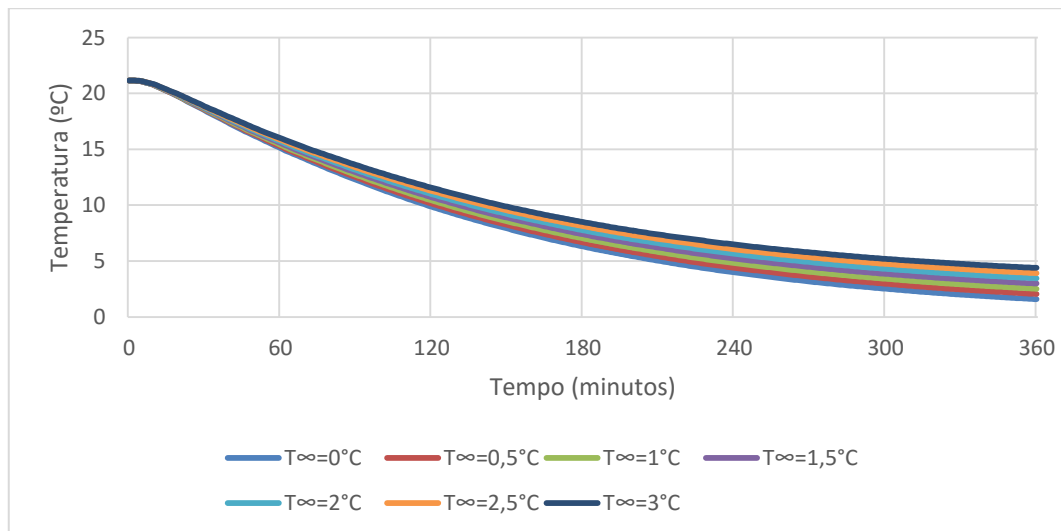


Figura 4.29 - Variação da temperatura ao longo tempo, Núcleo

Analisando as curvas presentes no gráfico da Figura 4.23, é possível observar um ligeiro atraso nos momentos iniciais, e que os efeitos da utilização de uma temperatura de fluido de arrefecimento mais elevada são pouco notórios para um arrefecimento de uma hora (para este caso particular), mas são cada vez mais notórios à medida que o ensaio decorre.

Na Tabela 4.31 encontram-se referidos os valores de temperatura no núcleo do modelo para os instantes de tempo de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 horas, para as várias  $T_{\infty}$  consideradas.

Tabela 4.31 - Temperatura em intervalos de 1 hora para os vários valores de temperatura de escoamento não perturbado, Núcleo

$T_{\infty}$ °C	Tempo (horas)					
	1	2	3	4	5	6
0,0	15,1	9,9	6,3	4,0	2,5	1,6
0,5	15,3	10,1	6,7	4,4	3,0	2,1
1,0	15,4	10,4	7,0	4,8	3,4	2,5
1,5	15,6	10,7	7,4	5,2	3,9	3,0
2,0	15,7	11,0	7,8	5,6	4,3	3,5
2,5	15,9	11,3	8,1	6,1	4,7	3,9
3,0	16,0	11,6	8,5	6,5	5,2	4,4
$\Delta 3 e 0$	0,9	1,7	2,2	2,5	2,7	2,8

Ao final da primeira hora de ensaio, os modelos sujeitos a uma  $T_{\infty}$  de 0°C têm a sua temperatura reduzida para os 15,1°C, e os modelos sujeitos a uma  $T_{\infty}$  de 3°C atingem os 16°C, existindo assim uma diferença de 0,9°C entre ambos. Esta diferença de temperatura vai aumentando de forma progressiva, atingindo o valor de 2,8°C na 6ª hora e ensaio. Este diferencial de temperatura deve-se ao facto de os modelos sujeitos a uma  $T_{\infty}$  de 0°C apresentarem uma maior taxa de transmissão de calor resultante de uma diferença de temperatura mais elevada entre o modelo e o meio de arrefecimento. Os modelos sujeitos a uma temperatura de fluido de arrefecimento de 3°C, comparativamente aos modelos sujeitos a uma  $T_{\infty}$  de 0°C (até às 4h de ensaio), atingem os 15,1°C aos 70 minutos (10 minutos mais tarde), os 9,9 aos 150 minutos (30 minutos mais tarde), os 6,3 aos 245 minutos (65 minutos mais tarde), os 4,0 aos 403 minutos (163 minutos mais tarde) e os 3,0 aos 661 minutos (360 minutos mais tarde). A diferença em minutos vai aumentando progressivamente, devido à transmissão de calor cada vez mais reduzida entre o modelo e o meio.

Na Figura 4.30 representa-se a variação da temperatura ao longo do tempo na superfície, para as várias temperaturas de fluido de arrefecimento consideradas.

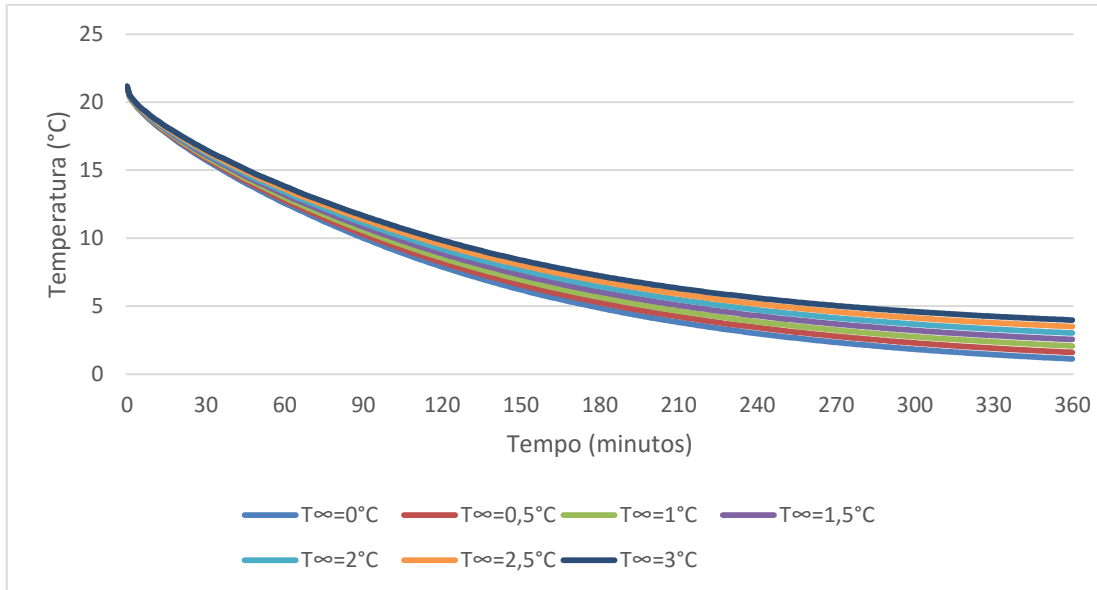


Figura 4.30 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Superfície

No arrefecimento à superfície, a temperatura desce a partir do instante inicial, não existindo qualquer atraso. O processo de arrefecimento é ligeiramente mais acentuado, resultando num reduzido gradiente térmico entre o núcleo e a superfície. Também, de forma análoga ao arrefecimento no núcleo, os efeitos de uma temperatura de arrefecimento mais reduzida são notórios para tempos de ensaio mais extensos.

Na Tabela 4.32 encontram-se representados os valores de temperatura na superfície para os instantes de tempo de 1, 2, 3, 4, 5 e 6h, para as diferentes  $T_{\infty}$  consideradas.

Tabela 4.32 - Temperatura em intervalos de 10 minutos para os vários valores de temperatura de escoamento não perturbado, Superfície

$T_{\infty}$ °C	Tempo (horas)					
	1	2	3	4	5	6
0,0	13,0	8,5	5,4	3,4	2,2	1,4
0,5	13,2	8,8	5,8	3,9	2,6	1,8
1,0	13,4	9,1	6,2	4,3	3,1	2,3
1,5	13,6	9,4	6,6	4,7	3,5	2,8
2,0	13,8	9,7	6,9	5,1	4,0	3,2
2,5	14,0	10,0	7,3	5,6	4,4	3,7
3,0	14,2	10,3	7,7	6,0	4,9	4,2
$\Delta 35 \text{ e } 20$	1,2	1,9	2,3	2,6	2,7	2,8

Comparando os resultados obtidos para a variação da temperatura, expostos anteriormente, com os relativos à Tabela 4.33, conclui-se que para além da temperatura na superfície ser inferior à temperatura no núcleo (para os mesmos instantes de tempo), a diferença de temperatura entre os modelos arrefecidos com  $T_{\infty}$  de 0°C e 3°C é superior para as primeiras 4 horas de ensaio, igualando-se na 5ª e 6ª hora. Os modelos sujeitos a uma  $T_{\infty}$  de 3°C, comparativamente aos modelos sujeitos a uma  $T_{\infty}$  de 0°C (até estes atingirem os 3°C), atingem os 13,0°C aos 76 minutos (16 minutos mais tarde), os 8,5 aos 160 minutos (40 minutos mais tarde), os 5,4 aos 269 minutos (89 minutos mais tarde), os 3,4 aos 460 minutos (223 minutos mais tarde) e os 3,0 aos 650 minutos (397 minutos mais tarde). A diferença em minutos vai aumentando progressivamente, devido à transmissão de calor cada vez mais reduzida entre o modelo e o meio.

Na Tabela 4.33 encontra-se representada a diferença de temperatura entre o núcleo e superfície, para os modelos sujeitos a várias  $T_{\infty}$

Tabela 4.33 - Diferença de temperatura entre núcleo e superfície, para as várias  $T_{\infty}$  e instantes de tempo

$T_{\infty}$ °C	Tempo (horas)					
	1	2	3	4	5	6
0,0	2,1	1,4	0,9	0,6	0,4	0,2
0,5	2,1	1,4	0,9	0,6	0,4	0,2
1,0	2,0	1,3	0,9	0,5	0,3	0,2
1,5	2,0	1,3	0,8	0,5	0,3	0,2
2,0	1,9	1,3	0,8	0,5	0,3	0,2
2,5	1,9	1,3	0,8	0,5	0,3	0,2
3,0	1,8	1,2	0,8	0,5	0,3	0,2

Analisando os resultados explicitados na tabela anterior conclui-se que o gradiente térmico é ligeiramente mais pronunciado para os modelos sujeitos a um  $T_{\infty}$  de valor inferior. Para a totalidade do ensaio considerado (6 horas), a diferença de temperatura entre o núcleo e superfície tem o valor de 0,2°C para todas as temperaturas de fluido de arrefecimento consideradas.

#### 4.2.3.2. Arrefecimento a água

Na Tabela 4.34 encontram-se expostos os parâmetros utilizados no COMSOL com o intuito de estudar o efeito da variação da temperatura do fluido de arrefecimento no caso de arrefecimento a água. A temperatura foi variada dos 0 aos 3°C, em incrementos de 0,5°C. O tempo de ensaio escolhido foi de 120 minutos, com o objectivo de obter uma maior gama de resultados para determinar qual o tempo adicional que os modelos sujeitos a uma  $T_{\infty}$  de 3°C têm de permanecer no sistema de arrefecimento face aos modelos arrefecidos a uma  $T_{\infty}$  de 0°C (para uma duração de ensaio de 50 minutos, equivalente ao ensaio de arrefecimento a água experimental).

Tabela 4.34 - Condições de ensaio para o arrefecimento a água

Coeficiente convectivo [W/m <sup>2</sup> K]	Diâmetro [mm]	Temperatura inicial [K]	Duração do ensaio (min)
680	64,6	295,3	120

Na Figura 4.31 representa-se a variação da temperatura adimensional no núcleo ao longo do tempo, para as várias temperaturas de fluido de arrefecimento consideradas.

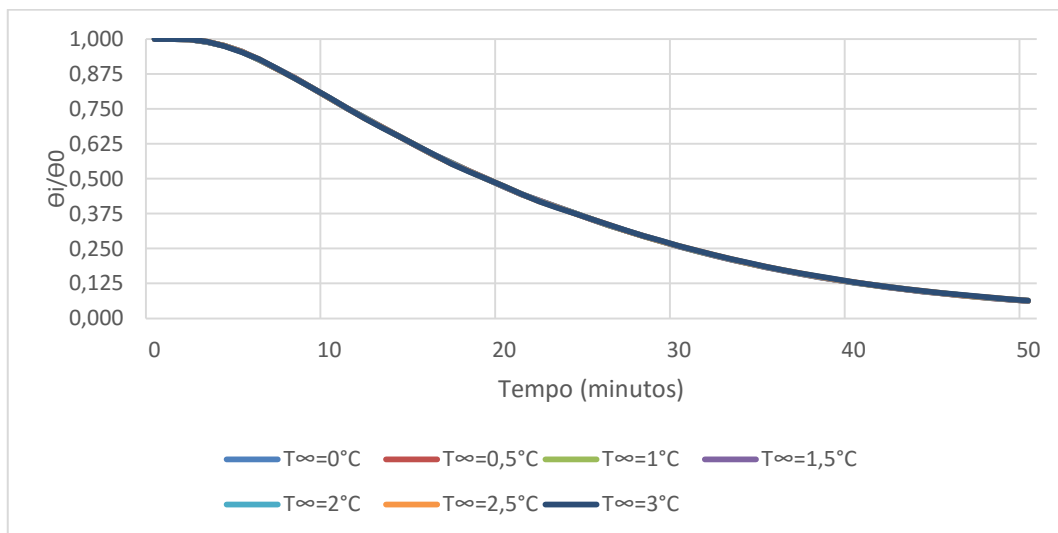


Figura 4.31 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Núcleo

A variação da temperatura adimensional ao longo do tempo é independente do valor de  $T_{\infty}$  escolhido. O arrefecimento no núcleo apresenta um ligeiro atraso nos minutos iniciais do processo de arrefecimento. O comportamento das curvas de arrefecimento representadas anteriormente é semelhante ao que se verificou na Figura 4.23.

Na Tabela 4.35 encontram-se representados os valores obtidos a partir do COMSOL para o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento, como também a sua diferença em percentagem e em minutos. Os valores são relativos ao arrefecimento no núcleo quando sujeito a arrefecimento a água.

Tabela 4.35 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo

$T_{\infty}$ °C	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	7/8 (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
0,0	19	40	110,5	21
0,5	19	40	110,5	21
1,0	19	40	110,5	21
1,5	19	40	110,5	21
2,0	19	41	115,8	22
2,5	19	41	115,8	22
3,0	19	41	115,8	22

Para os parâmetros referidos na Tabela 4.34, o valor de Tempo de Meio Arrefecimento obtido é igual para todos os valores de  $T_{\infty}$  considerados, e tem o valor de 19 minutos. O Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento varia entre 40 e 41 minutos. Isto resulta numa diferença compreendida entre 110,5 e 115,8%, existindo uma diferença de 21 minutos entre o  $t_{1/2}$  e  $t_{7/8}$ .

Na Figura 4.32 representa-se a variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, para o caso de arrefecimento à superfície, para as várias temperaturas de fluido de arrefecimento consideradas.

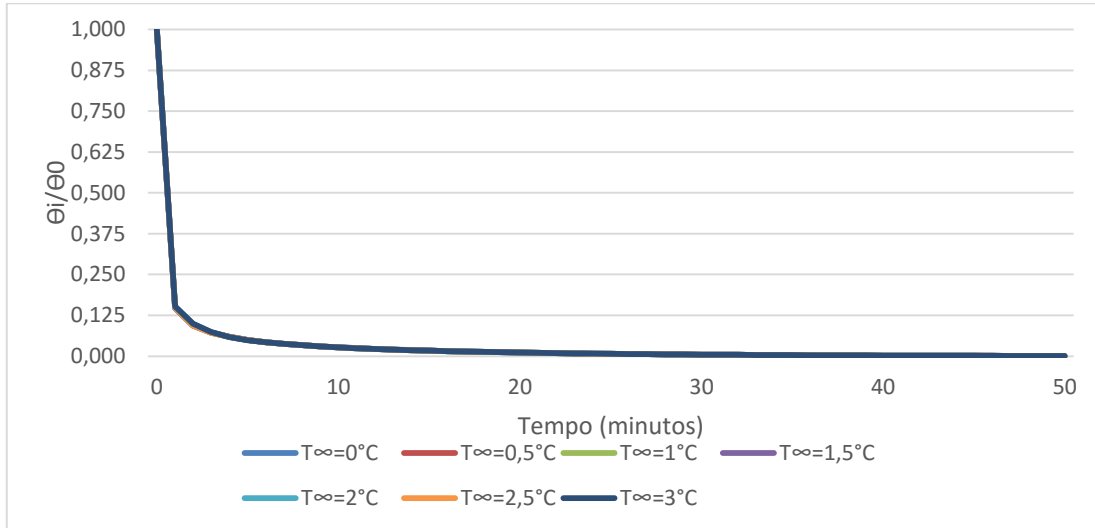


Figura 4.32 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Superfície

A variação da temperatura adimensional apresenta um comportamento semelhante ao verificado na Figura 4.24 para o caso da variação da temperatura de entrada. Estes são semelhantes devido à ausência de atraso nos instantes iniciais do processo de arrefecimento e devido ao facto de a variação da temperatura adimensional ser independente da temperatura de fluido escolhida.

Na Tabela 4.36 encontram-se representados os valores obtidos a partir do COMSOL para o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento relativos ao arrefecimento da superfície. É também referida a diferença entre estes dois valores em percentagem e em minutos.

Tabela 4.36 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície

$T_{\infty}$ °C	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	7/8 (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
0,0	0,05	1,30	2500,0	1,25
0,5	0,05	1,22	2333,3	1,17
1,0	0,05	1,20	2300,0	1,15
1,5	0,05	1,20	2300,0	1,15
2,0	0,05	1,20	2300,0	1,15
2,5	0,05	1,20	2300,0	1,15
3,0	0,05	1,18	2266,7	1,13

Os instantes de tempo relativos ao Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento são 0,05 e 1,25 a 1,27 minutos, respetivamente. A diferença em percentagem entre o  $t_{1/2}$  e  $t_{7/8}$  varia entre os 2400 e 2433,3%. A diferença em minutos varia entre os 1,2 e 1,22 minutos. A diferença entre os valores referidos anteriormente, e os representados na Tabela 4.35 (relativos à variação da temperatura adimensional no núcleo) produz, como seria expectável, um gradiente térmico no modelo.

Representa-se na Figura 4.33 a variação da temperatura no núcleo ao longo do tempo, para as várias temperaturas do fluido de arrefecimento consideradas.

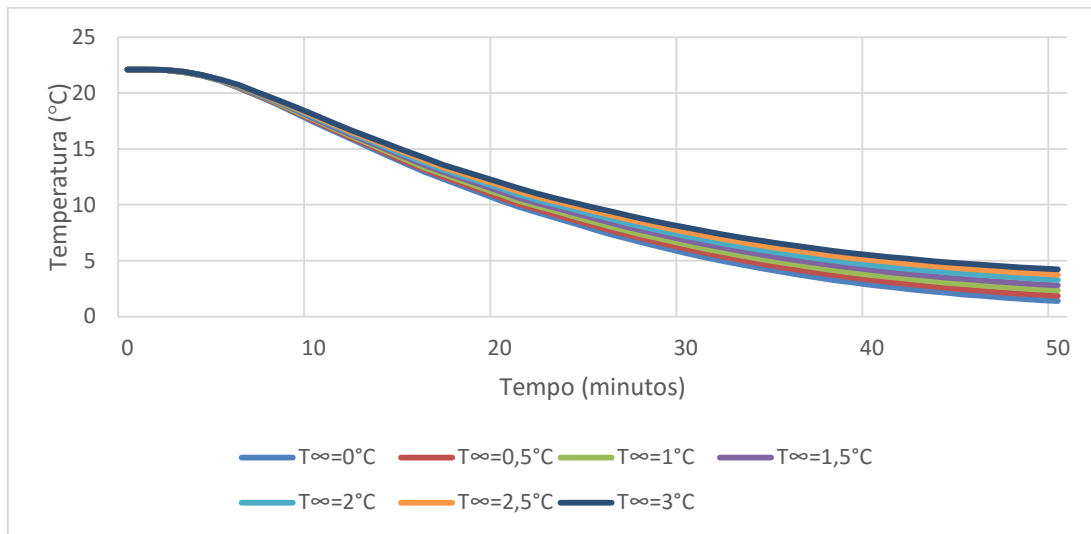


Figura 4.33 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Núcleo

Verifica-se um ligeiro atraso inicial no processo de arrefecimento do núcleo. Este processo de arrefecimento dá-se de forma mais expedita, comparando com o arrefecimento a ar. Até aos 10 minutos de ensaio não se verificam diferenças significativas entre as várias  $T_{\infty}$ , mas tal como se observou no estudo da variação de  $T_{\infty}$  no caso do arrefecimento a ar, os efeitos tornam-se mais pronunciados quanto mais extenso se tornar o ensaio.

Na Tabela 4.37 encontram-se representados os valores de temperatura no núcleo para os instantes de tempo de 10, 20, 30, 40 e 50 minutos, para as várias  $T_{\infty}$  consideradas.

Tabela 4.37 - Temperatura em intervalos de 10 minutos para os vários valores de temperatura de escoamento não perturbado, Núcleo

T <sub>∞</sub> °C	Tempo (minutos)				
	10	20	30	40	50
0,0	17,4	10,4	5,7	2,8	1,4
0,5	17,5	10,7	6,1	3,3	1,9
1,0	17,6	11,0	6,5	3,7	2,3
1,5	17,8	11,2	6,8	4,2	2,8
2,0	17,9	11,5	7,2	4,6	3,3
2,5	18,0	11,8	7,6	5,0	3,7
3,0	18,1	12,0	8,0	5,5	4,2
Δ 3 e 0	0,6	1,6	2,3	2,7	2,8

Através dos dados anteriormente representados é possível observar que ao final de 10 minutos de ensaio os modelos arrefecidos com  $T_{\infty}$  de  $0^{\circ}\text{C}$  atingem os  $17,4^{\circ}\text{C}$  e os modelos arrefecidos com  $T_{\infty}$  de  $3^{\circ}\text{C}$  atingem os  $18,1^{\circ}\text{C}$ . Existe assim, ao fim dos 10 primeiros minutos, uma diferença de  $0,6^{\circ}\text{C}$  entre estes. Esta diferença aumenta constantemente até ao fim do ensaio (50 minutos). A diferença de temperatura ao fim dos 50 minutos de arrefecimento a água é idêntica à diferença de temperaturas obtida na Tabela 4.31 ao fim de 6 horas, para o arrefecimento a ar. Os modelos arrefecidos a água atingem a mesma temperatura que os modelos sujeitos ao arrefecimento a ar ao fim de 48 minutos. Desta forma, o processo de arrefecimento a água, para este caso particular, é 7,5 vezes mais rápido. Os modelos arrefecidos por uma  $T_{\infty}$  de  $3^{\circ}\text{C}$  atingem os  $17,4^{\circ}\text{C}$  aos 11 minutos (1 minuto adicional), os  $10,4^{\circ}\text{C}$  aos 23 minutos (3 minutos adicionais), os  $5,7^{\circ}\text{C}$  aos 39 minutos (9 minutos adicionais) e os  $3^{\circ}\text{C}$  aos 120 minutos (81 minutos adicionais).

Na Figura 4.34 representa-se a variação da temperatura na superfície do modelo quando sujeito às várias temperaturas de arrefecimento consideradas.

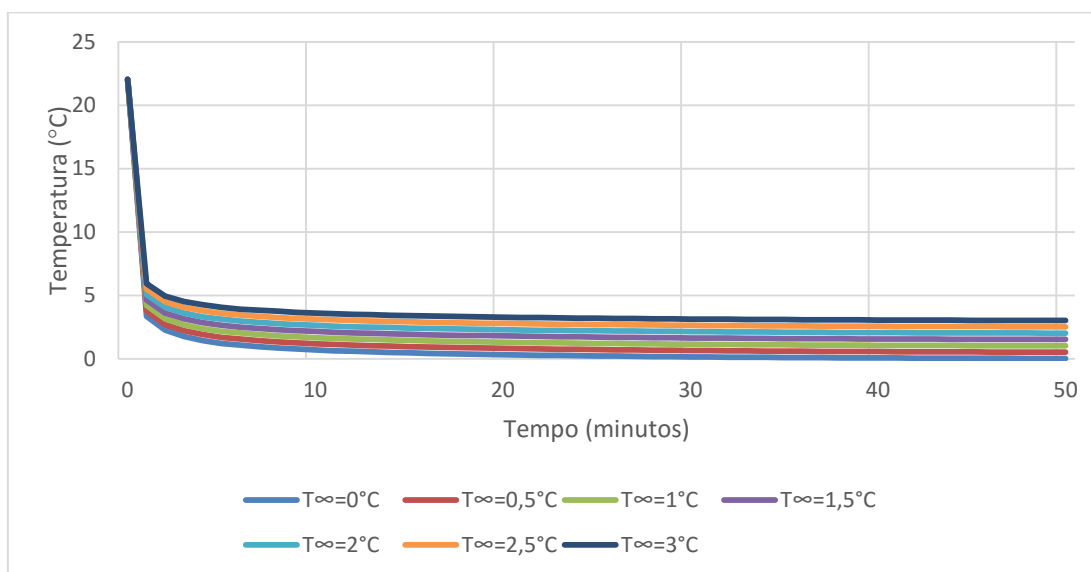


Figura 4.34 - Variação da temperatura ao longo do tempo, Superfície

Analisando a variação da temperatura da superfície, representada na Figura 4.34, é possível observar um rápido decaimento da temperatura, e o instante de tempo onde cada modelo (sujeito à sua respetiva temperatura de fluido de arrefecimento) atinge o Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento, e a temperatura do modelo, diminui cada vez mais lentamente, até entrar em equilíbrio com o meio de arrefecimento.

Representa-se na Tabela 4.38 a diferença de temperatura entre o núcleo e a superfície, em intervalos de 10 minutos, para as várias  $T_{\infty}$  consideradas.

Tabela 4.38 - Diferença de temperatura entre núcleo e superfície, em intervalos de 10 minutos para os vários valores de temperatura de escoamento não perturbado

T <sub>∞</sub> °C	Tempo (minutos)				
	10	20	30	40	50
0,0	16,7	10,1	5,5	2,8	1,3
0,5	16,3	9,8	5,4	2,7	1,3
1,0	16,0	9,6	5,3	2,6	1,3
1,5	15,6	9,4	5,2	2,6	1,3
2,0	15,2	9,2	5,1	2,5	1,2
2,5	14,8	9,0	4,9	2,5	1,2
3,0	14,5	8,7	4,8	2,4	1,2

O gradiente térmico presente entre o núcleo e superfície é mais pronunciado no início do ensaio, e para as temperaturas de fluido de arrefecimento mais baixas, devido à maior transmissão de calor da superfície para o meio. Este gradiente térmico vai diminuindo à medida que o ensaio decorre, até que aos 50 minutos o gradiente térmico entre o núcleo a superfície é relativamente idêntico para os vários modelos, variando entre 1,2 e 1,3°C.

### 4.3. Nota conclusiva

Foram estudados os efeitos da variação do diâmetro do modelo computacional, da sua temperatura inicial e da temperatura de escoamento não perturbado aplicada na variação da temperatura ao longo do tempo no modelo computacional, para ambos os casos de arrefecimento a ar e a água. No caso de estudo da variação do diâmetro no tempo de arrefecimento foram expostos os vários tipos de calibre existentes, e as gamas de diâmetro correspondentes a cada calibre. Foi estudado o caso particular do Calibre D e foi feita uma comparação global utilizando o primeiro diâmetro de cada calibre. Notou-se que não se verificam diferenças significativas na variação da temperatura adimensional entre diâmetros adjacentes, mas que estas diferenças se tornam mais significativas à medida que se comparam valores de diâmetros cada vez mais díspares entre si. Assim, verifica-se um aumento dos valores do valor do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento que se torna progressivamente mais elevado com o aumento do diâmetro do modelo computacional. Estudou-se também a variação do gradiente térmico, com o incremento do diâmetro do modelo, entre o núcleo e a superfície. Verifica-se que o gradiente térmico aumenta à medida que se aumenta o diâmetro do modelo, e que este é mais pronunciado para o caso de arrefecimento a água. No caso de estudo de variação da temperatura inicial do modelo computacional verifica-se que a variação da temperatura adimensional ao longo do tempo é idêntica para as várias temperaturas iniciais

consideradas, não se verificando assim variações do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento, utilizando-se assim como comparação a variação da temperatura ao longo do tempo. Verificou-se que os efeitos da variação da temperatura inicial são mais pronunciados nos instantes iniciais de simulação, observando-se que o modelo atinge a mesma temperatura final independentemente da sua temperatura inicial aquando do início da simulação. Verifica-se também que o gradiente térmico se tende a anular à medida que o ensaio decorre, para ambos os casos de arrefecimento a ar e a água. No caso da variação da temperatura de escoamento não perturbado, verifica-se também que a temperatura na sua forma adimensional é idêntica qualquer que seja a temperatura de escoamento não perturbado, observando-se valores semelhantes para o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento. No caso de estudo do efeito da variação da temperatura de escoamento não perturbado verifica-se que os efeitos são progressivamente mais notórios à medida que o ensaio decorre. As diferenças de temperatura são pouco significativas para os instantes iniciais de ensaio. O gradiente térmico é mais significativo para valores de temperatura de escoamento não perturbado nos instantes iniciais de ensaio, mas este gradiente tende-se a anular à medida que o ensaio decorre, não se verificando também diferenças significativas entre os vários gradientes térmicos.

## 5. Conclusão

No presente capítulo é feita uma recapitulação do trabalho desenvolvido ao longo da presente dissertação, como são também exibidas recomendações para estudos futuros relacionados com o tema da caracterização do processo de arrefecimento do pêssego na fase da pós-colheita.

### 5.1. Recapitulação

Foi desenvolvido um modelo computacional na ferramenta COMSOL Multiphysics® para a previsão do comportamento térmico do pêssego ao longo do tempo. A partir do modelo desenvolvido foi realizado um estudo paramétrico, considerando diversas condições de dimensões de pêssego (para todos os diâmetros de todos os calibres existentes), temperatura inicial e temperatura de escoamento não perturbado, para ambos casos de arrefecimento a ar e arrefecimento a água.

Para a componente de validação do modelo computacional foram tomados como base os resultados obtidos experimentalmente para a variação da temperatura ao longo do tempo durante o arrefecimento em ar e em água de dois lotes de pêssego distintos. De forma a retratar o comportamento térmico no COMSOL Multiphysics® foi necessário o cálculo das propriedades termofísicas do pêssego, tais como a condutibilidade térmica, a massa volumica e a calor específico. De forma a modelar o arrefecimento a ar e a água foi realizada uma análise à literatura de forma a encontrar casos de estudo com configurações de arrefecimento semelhantes, com o intuito de definir os coeficientes convectivos a utilizar.

Estando todas as propriedades definidas no COMSOL Multiphysics foram comparados os resultados da variação da temperatura na sua forma adimensional ao longo do tempo obtidos pelo modelo computacional, e os dados obtidos experimentalmente. Para efeitos de comparação consideraram-se dois instantes de tempo distintos, o instante de tempo correspondente ao Tempo de Meio Arrefecimento (quanto a temperatura na sua forma adimensional atinge os 0,5), e o instante correspondente ao Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (quando a temperatura na sua forma adimensional atinge os 0,125, ou seja, a temperatura recomendada para o armazenamento).

Verificou-se uma boa concordância entre os resultados obtidos pelo COMSOL Multiphysics a componente experimental. Foi também realizada posteriormente uma verificação do modelo computacional com resultados obtidos a partir da utilização da solução analítica

para o caso de condução de calor unidimensional em regime transitório, verificando-se também uma boa concordância com o método analítico.

Analisando os resultados obtidos no capítulo 4, relativamente ao estudo paramétrico relativo à variação do diâmetro, verifica-se que não existem diferenças significativas nos tempos de arrefecimento considerando valores de diâmetro adjacentes, ou seja, de entre todos os diâmetros correspondentes ao mesmo calibre as diferenças nos instantes de tempo de  $t_{1/2}$  e  $t_{7/8}$  não são relevantes. No entanto à medida que se incrementa o diâmetro do modelo computacional, não só o tempo de arrefecimento é cada vez maior, como o gradiente térmico que se desenvolve no interior do modelo do núcleo para a superfície é cada vez mais significativo. Demonstrou-se que este gradiente é mais pronunciado para o caso de arrefecimento a água do que para o arrefecimento a ar, devido ao elevado coeficiente convectivo característico nos sistemas de arrefecimento a água.

Para o caso da variação da temperatura inicial do modelo computacional, verificou-se que estes são mais pronunciados nos instantes iniciais de simulação, observando-se que o modelo atinge a mesma temperatura final independentemente da sua temperatura inicial aquando do início da simulação. Verifica-se que o gradiente térmico tem a tendência de se anular à medida que o ensaio decorre para ambos os casos de arrefecimento a ar e a água.

Na análise paramétrica da variação da temperatura de escoamento não perturbado verifica-se que os efeitos são cada vez mais notórios à medida que o ensaio decorre. As diferenças de temperatura são pouco significativas para os instantes iniciais de ensaio. O gradiente térmico é mais significativo para valores de temperatura de escoamento não perturbado nos instantes iniciais de ensaio, mas este gradiente tende-se a anular à medida que o ensaio decorre, não se verificando também diferenças significativas entre os vários gradientes térmicos.

## **5.2. Sugestão para trabalho futuro**

Como sugestões para a realização de trabalho futuro relacionado com o tema da presente dissertação, salienta-se a importância de uma recolha de dados relativos à variação da temperatura do pêssego em várias posições dentro de um empacotamento de forma a fazer uma caracterização mais completa do processo de arrefecimento.

É também importante uma validação dos resultados obtidos a partir das simulações para os vários casos de estudo realizados no Capítulo 4, referentes ao estudo paramétrico realizado no COMSOL Multiphysics.

## Referências bibliográficas

### 6. Bibliografia

- ASHRAE. (1998). Chapter 9. Cooling and freezing Times of foods. Em *ASHRAE Refrigeration Handbook*.
- ASHRAE. (1998). Thermal Properties of Food. Em *ASHRAE Refrigeration Handbook*.
- ASHRAE. (2010). Chapter 28. Methods of precooling fruits, vegetables and cut flowers. Em *ASHRAE Refrigeration Handbook*.
- Becker, B. R., & Fricke, B. A. (1996). Transpiration and Respiration of Fruits and Vegetables. *New Developments in Refrigeration for Food Safety and Quality, International Institute of Refrigeration*, 110-121.
- Becker, B. R., & Fricke, B. A. (2002). Hydrocooling time estimation methods. *Int. Comm. Heat and Mass Transfer*, 165-174.
- Becker, B. R., Misra, A., & Fricke, B. A. (1996). Bulk Refrigeration of Fruits and Vegetables, Part I: Theoretical considerations of heat and mass transfer. *HVAC&R Research*, 122-134.
- Bennett, A. (1963). Thermal characteristics of peaches as related to hydro cooling. *Washington: U.S. Dept. of Agriculture*.
- Bennett, A. (1965). Hydrocooling Peaches - A practical guide for determining cooling requirements and cooling times. *Agriculture Research Service*.
- Borompichaichartkul, C., Kanlayanarat, S., Rolle, R., & Acedo Jr, A. (2009). Cooling and Cold Storage. *Horticultural Chain Management for Countries of Asia and the Pacific Region : A Training Package*, 124-135.
- Brosnan, T., & Sun, D. (2001). Precooling techniques and applications for horticultural products - a review. *International Journal of Refrigeration*, 154-170.
- COMSOL. (2008). Quick Start and Quick Reference. Em *COMSOL Multiphysics*® Version 3.5 (p. 9).
- COMSOL. (2012). Heat Transfer Module User's Guide. Em COMSOL, *COMSOL Multiphysics*® version 4.3 (pp. 31-42).
- COMSOL. (2015). Reference Manual. Em COMSOL, *COMSOL Multiphysics*® 5.2 (p. 508).
- Dincer, I. (1992). Heat-Transfer coefficients in hydrocooling of spherical and cylindrical food products.
- Dincer, I. (1997). *Heat Transfer in Food Cooling Applications*. CRC Press.

- Dincer, I. (2000). Thermal Processing in Food Preservation Technologies. Em *The CRC Handbook of Thermal Engineering* (pp. 440-457).
- Dincer, I., Yildiz, M., Loker, M., & Gun, H. (1992). Process parameters for hydrocooling apricots, plums, and peaches. *International journal of food science & technology*, 347-352.
- FAO. (2009). *How to Feed the World in 2050*. Obtido em 1 de Agosto de 2016, de [http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert\\_paper/How\\_to\\_Feed\\_the\\_World\\_in\\_2050.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf)
- FAO. (2012). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Obtido em 1 de Agosto de 2016, de FAO: <http://www.fao.org/save-food/resources/keyfindings/infographics/fruit/en/>
- Fricke, B. A. (2006). Precooling Fruits & Vegetables. *ASHRAE Journal*, 20-28.
- Gast, K. L., & Flores, R. (1991). Precooling produce--fruits & vegetables. *MF.Cooperative Extension Service, Kansas State University, Manhatan*.
- Ghiaus, A., & Vasilescu, C. (2010). Thermal analysis of strawberry preservation by cooling and freezing. *International Congress on Engineering and Food*.
- Gustavsson, J., Cederberg, C., & Sonesson, U. (2011). Global Food Losses And Food Waste, Extents Causes and Preventions. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 8.
- Han, J. W., Zhao, C. J., Yang, X. T., Qian, J. P., & Fan, B. L. (2015). Computational modeling of airflow and heat transfer in a vented box during cooling: Optimal package design. *Applied Thermal Engineering*, 883-893.
- Jornal Oficial da União Europeia. (2011). Norma de comercialização aplicável aos pêssegos e nectarinas. *Jornal Oficial da União Europeia*, 88.
- Kader, A. (2013). Postharvest technology of horticultural crops-An overview from farm to fork. *Ethiop. J. Appl. sci. Technol.*, 1-8.
- Kitinoja, L. (2013). Use of cold chains for reducing food losses in developing countries. *The Postharvest Education Foundation (PEF)*, 3.
- M. S., A., & M. W., S. (2016). Em *Postharves Quality Assurance of Fruits* (pp. 1-7). Springer Internation Publishing.
- Mascheroni, R. H. (2012). *Operations in Food Refrigeration*. CRC Press.
- Mitchell, F. G., Guillou, R., & Parsons, R. A. (1972). Commercial Cooling of Fruits and Vegetables. *California Agricultural Experiment Station*.
- Nunes, M. (2008). Em *Color Atlas of Postharvest Quality of Fruits and Vegetables* (p. 6). John Wiley & Sons.

- Pathare, B. P., Opara, U. L., Vigneault, C., Delele, M. A., & Al-Said, F. (2012). Design of Packaging Vents for Cooling Fresh Horticultural Produce. *Food Bioprocess Technol*, 2031-2045.
- Rao, K. N., Narasimham, G. S., & Murthy, M. K. (1992). Analysis of co-current hydraircooling of food products in bulk. *International journal of heat and fluid flow*, 300-310.
- Rao, K. N., Narasimham, G. S., & Murthy, M. K. (1993). Analysis of heat and mass transfer during bulk hydraircooling of spherical food products. *Int. J. Heat Mass transfer*, 809-822.
- Sargent, S. A., Talbot, M. T., & Brecht, J. K. (1988). Evaluating precooling methods for vegetable packinghouse operations. *Eng. Sci*, 1147-1155.
- Senthilkumar, S., Vijayakumar, R. M., & Kumar, S. (2015). Advances in Precooling techniques and their implications in horticulture sector - A Review. *International Journal of Environment & Agriculture Research*, 24-30.
- Thompson, J. F. (2004). Pre-Cooling and storage facilities. *Agriculture Handbook*.
- United Nations. (2008). *World Urbanization Prospects The 2007 Revision*. Obtido em 1 de Agosto de 2016, de United Nations: [http://www.un.org/esa/population/publications/wup2007/2007WUP\\_Highlights\\_web.pdf](http://www.un.org/esa/population/publications/wup2007/2007WUP_Highlights_web.pdf)
- Vigneault, C., De Castro, L. R., Goyette, B., Markarian, N. R., Charles, M. T., Bourgeois, G., & Perez, L. A. (2007). Indirect airflow distribution measurement method for horticultural crop package design. *Canadian Biosystems Engineering*.
- Wang, L., & Sun, D. W. (2001). Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology. *Trends in Food Science & Technology*, 174-184.



## Anexos

No capítulo Anexo exibem-se primeiramente os dados obtidos no estudo paramétrico da variação do diâmetro do modelo computacional, para os calibres C a AAAA. Representa-se também os cálculos realizados para a obtenção das propriedades termofísicas aplicadas no modelo computacional. Relativamente aos calibres C a AAAA representam-se as curvas de variação de temperatura adimensional ao longo do tempo, as correlações obtidas para o Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento, as tabelas produzidas com os valores do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos obtidos para cada diâmetro de cada calibre e a comparação entre a variação da temperatura adimensional no núcleo e superfície ao longo do tempo para o primeiro diâmetro de cada calibre.

### Anexo A

#### A.1. Refrigeração a ar

Representam-se os dados obtidos para o caso de refrigeração a ar. Apresentar-se-ão primeiramente os dados obtidos para o núcleo, depois para a superfície, e por último a comparação entre os dois para o primeiro diâmetro de cada calibre.

##### A.1.1. Calibre C - Núcleo

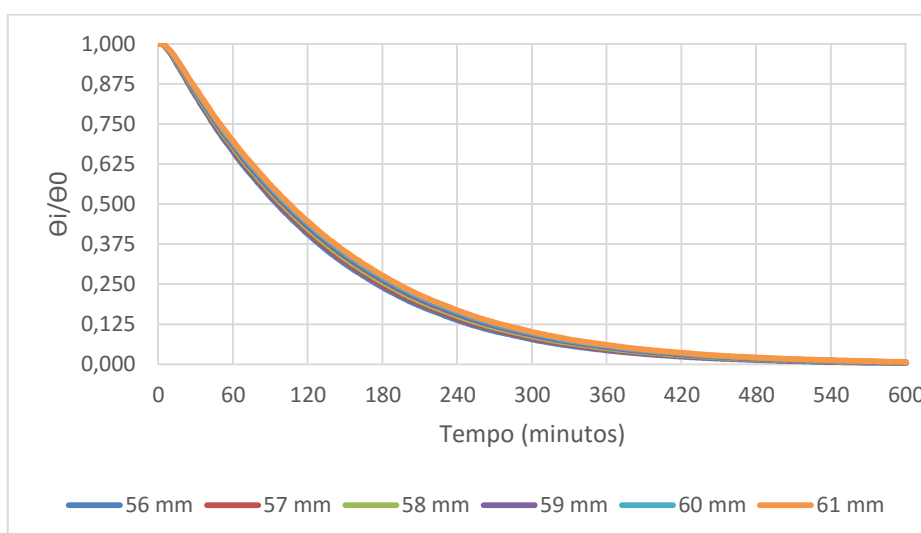


Figura A.1 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre C, Núcleo

Tabela A.1 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre C

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
56	95	250	163,1	155
57	97	254	161,8	157
58	99	260	162,6	161
59	101	265	162,3	164
60	103	270	162,1	167
61	105	275	161,9	170

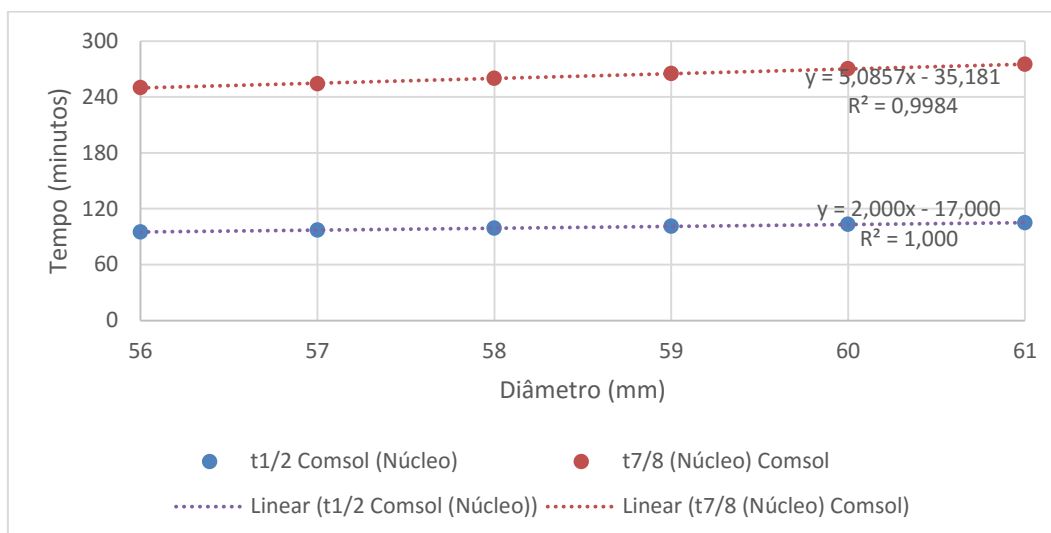


Figura A.2 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre C, Núcleo

### A.1.2. Calibre C - Superfície

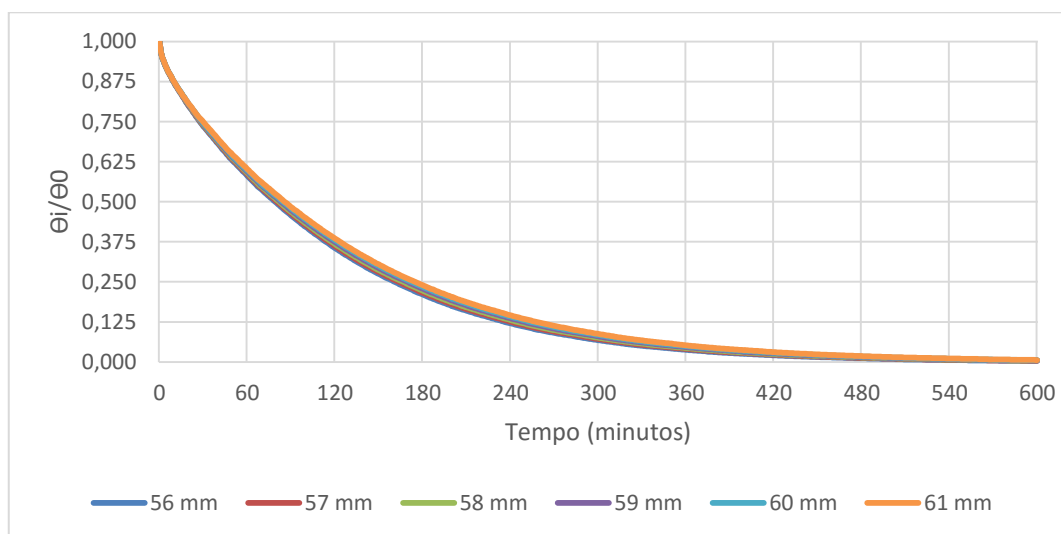


Figura A.3 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre C, Superfície

Tabela A.2 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre C

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
56	79	236	198,7	157
57	80	241	201,2	161
58	82	245	198,7	163
59	83	250	201,2	167
60	84	254	202,3	170
61	86	258	200,0	172

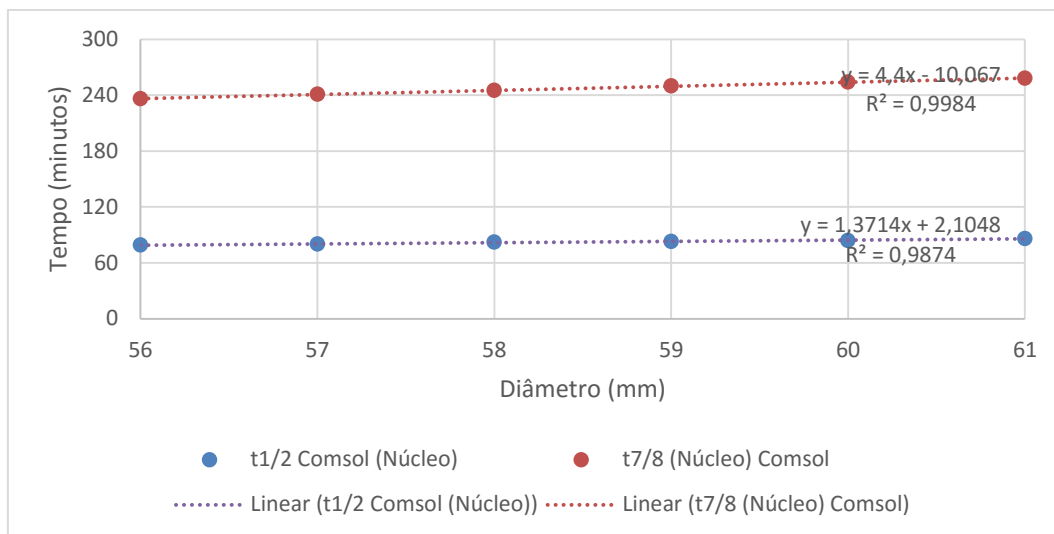


Figura A.4 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre C, Superfície

### A.1.3. Calibre C - Comparação entre Núcleo e Superfície

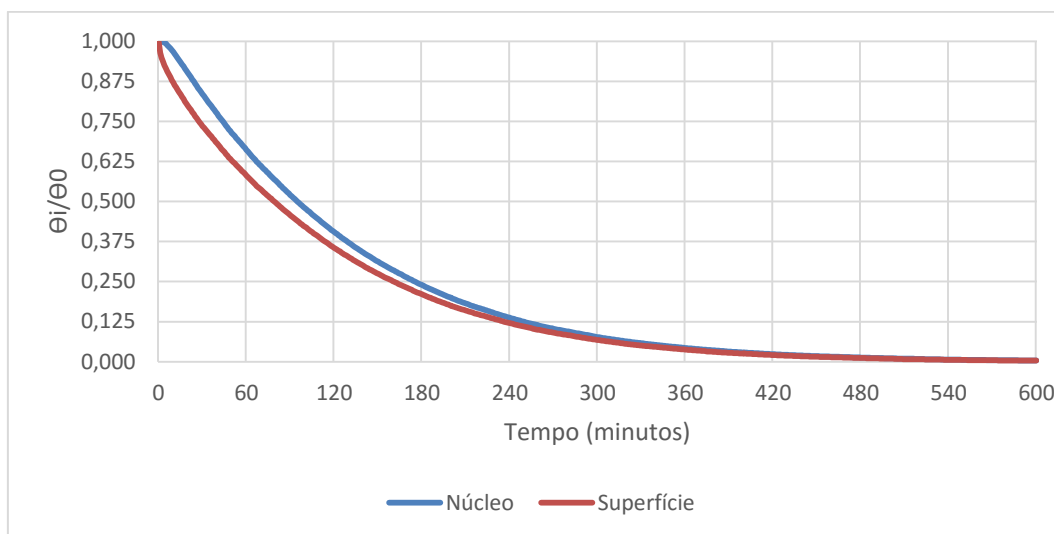


Figura A.5 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 56 mm, Núcleo e Superfície

Tabela A.3 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre C

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
56	95	79	16,8	16
57	97	80	17,5	17
58	99	82	17,1	17
59	101	83	17,8	18
60	103	84	18,4	19
61	105	86	18,1	19

Tabela A.4 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre C

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
56	250	236	5,6	14
57	254	241	5,1	13
58	260	245	5,7	15
59	265	250	5,6	15
60	270	254	5,9	16
61	275	258	6,1	17

### A.1.4. Calibre B - Núcleo

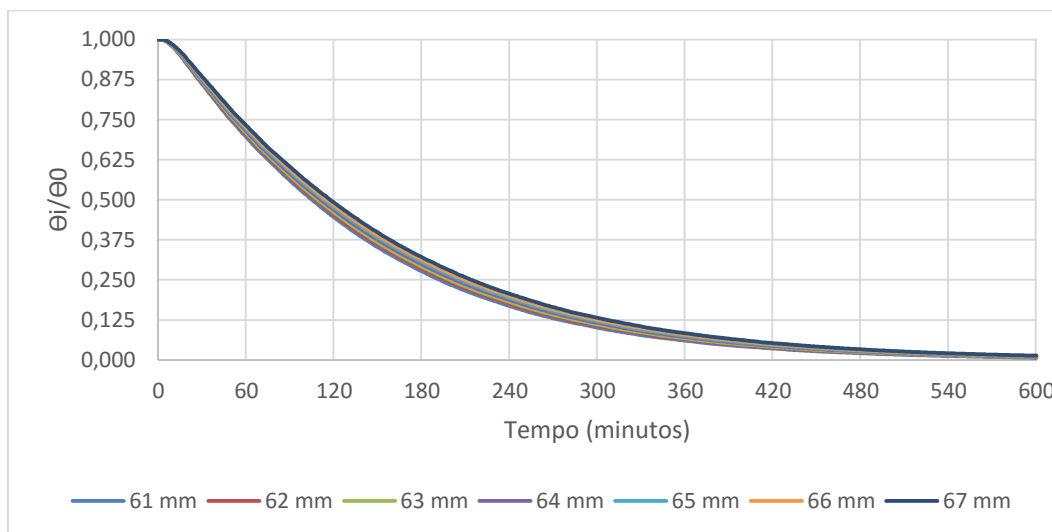


Figura A.6 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre B, Núcleo.

Tabela A.5 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre B

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
61	105	275	161,9	170
62	107	280	161,6	173
63	109	285	161,4	176
64	111	291	162,1	180
65	113	296	161,9	183
66	115	301	161,7	186
67	117	307	162,3	190

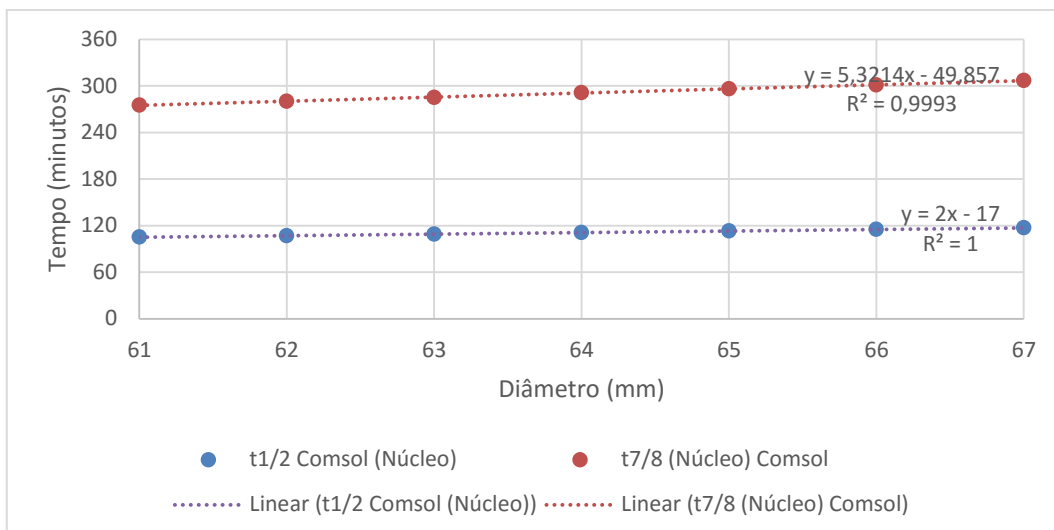


Figura A.7 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre B, Núcleo

### A.1.5. Calibre B - Superfície

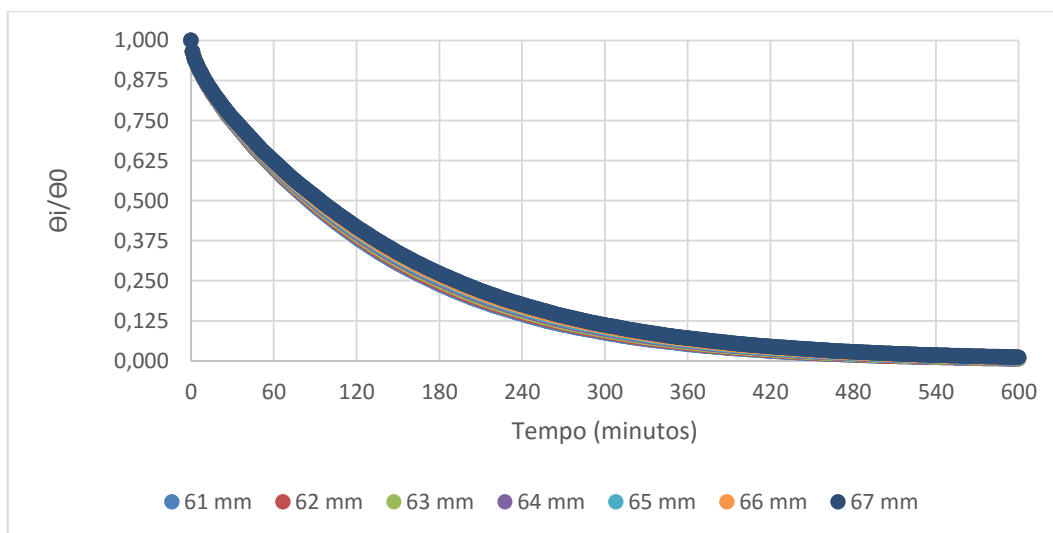


Figura A.8 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre B, Superfície

Tabela A.6 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre B

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
61	86	258	200,0	172
62	87	262	201,1	175
63	88	267	203,4	179
64	89	271	204,4	182
65	91	276	203,3	185
66	92	280	204,3	188
67	94	285	203,1	191

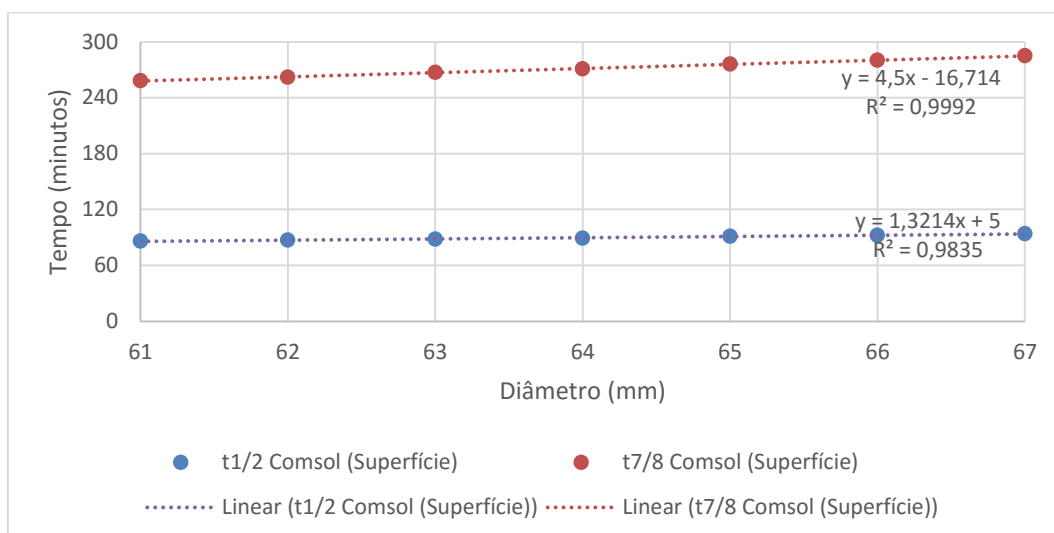


Figura A.9 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre B, Superfície

### A.1.6. Calibre B - Comparação entre núcleo e superfície

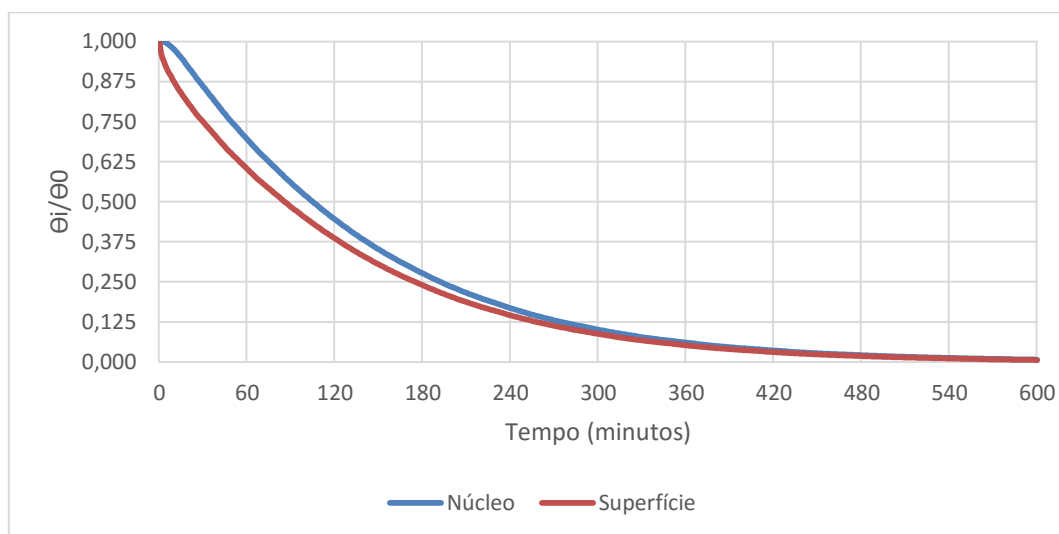


Figura A.10 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 61mm, Núcleo e Superfície

Tabela A.7 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre B

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
61	105	86	18,1	19
62	107	87	18,6	20
63	109	88	19,2	21
64	111	89	19,8	22
65	113	91	19,4	22
66	115	92	20,0	23
67	117	94	19,6	23

Tabela A.8 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre B

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
61	275	258	6,1	17,
62	280	262	6,4	18
63	285	267	6,3	18
64	291	271	6,8	20
65	296	276	6,7	20
66	301	280	6,9	21
67	307	285	7,1	22

### A.1.7. Calibre A - Núcleo

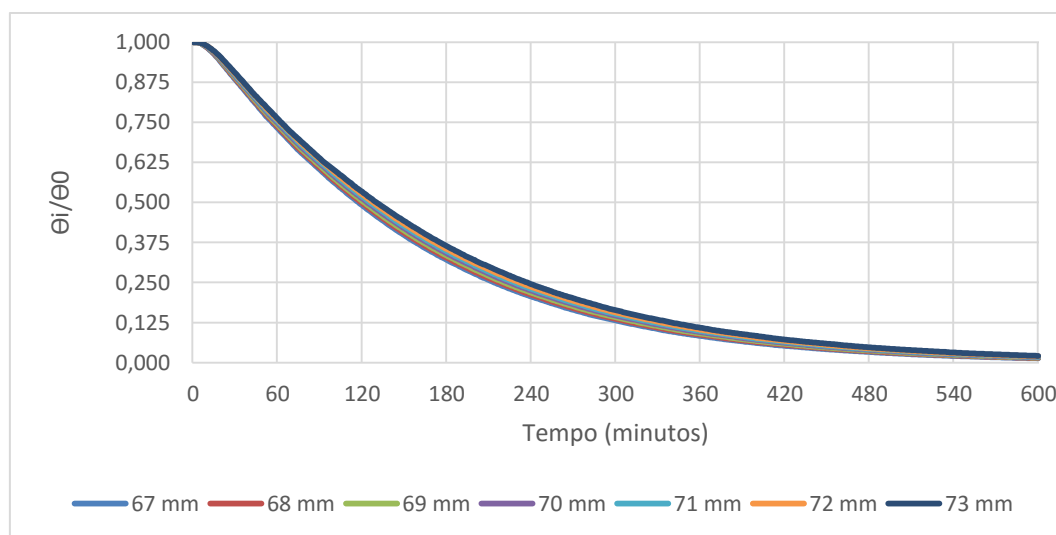


Figura A.11 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre A, Núcleo

Tabela A.9 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre A

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
67	117	307	162,3	190
68	119	312	162,8	193
69	121	317	161,9	196
70	124	323	160,4	199
71	126	328	160,3	202
72	128	333	160,6	205
73	130	340	161,4	210

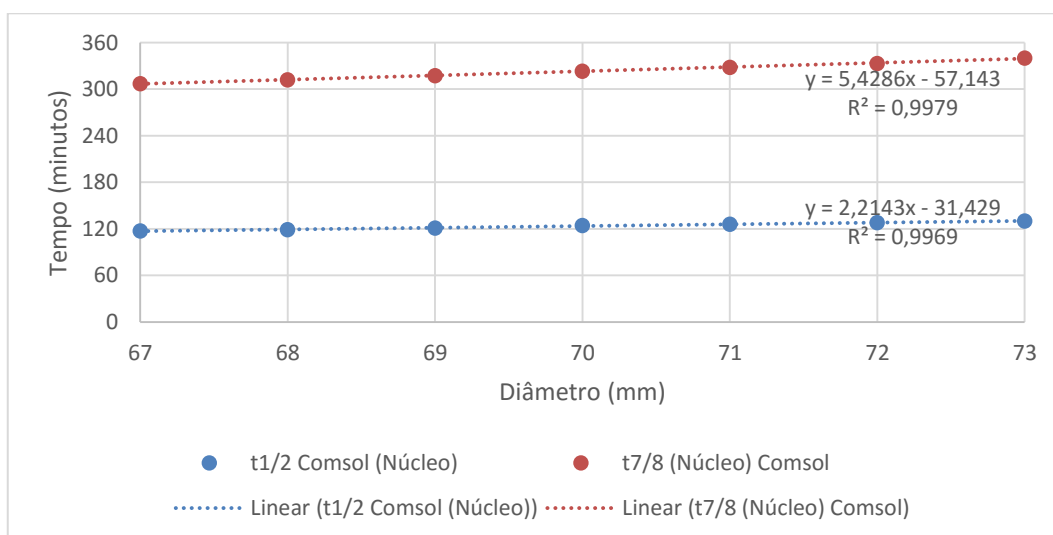


Figura A.12 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre A, Núcleo

### A.1.8 Calibre A - Superfície

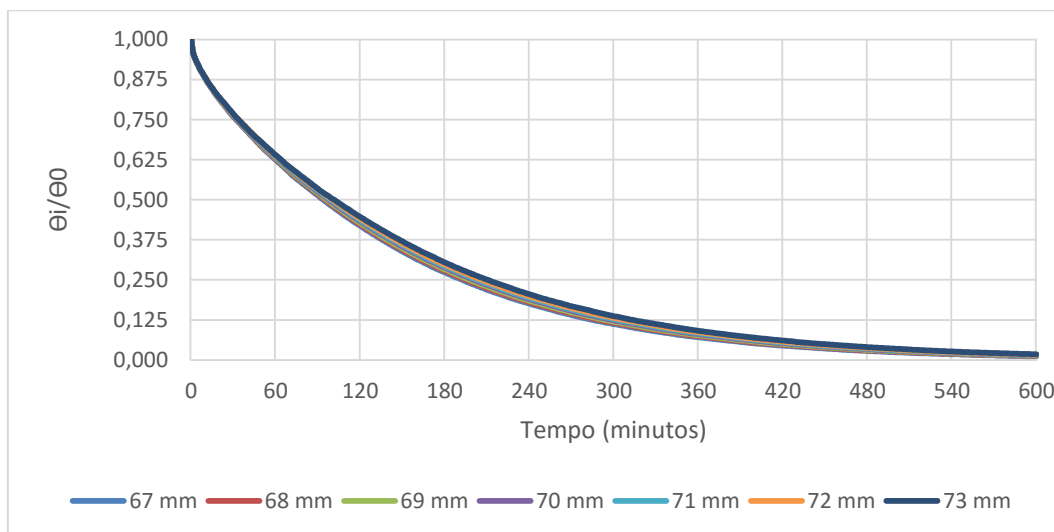


Figura A.13 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre A, Superfície

Tabela A.10 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre A

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	Δ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	Δ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
67	94	285	203,1	191
68	95	290	205,2	195
69	96	294	206,2	198
70	97	299	208,2	202
71	99	303	206,0	204
72	100	308	208,0	208
73	101	314	210,8	213

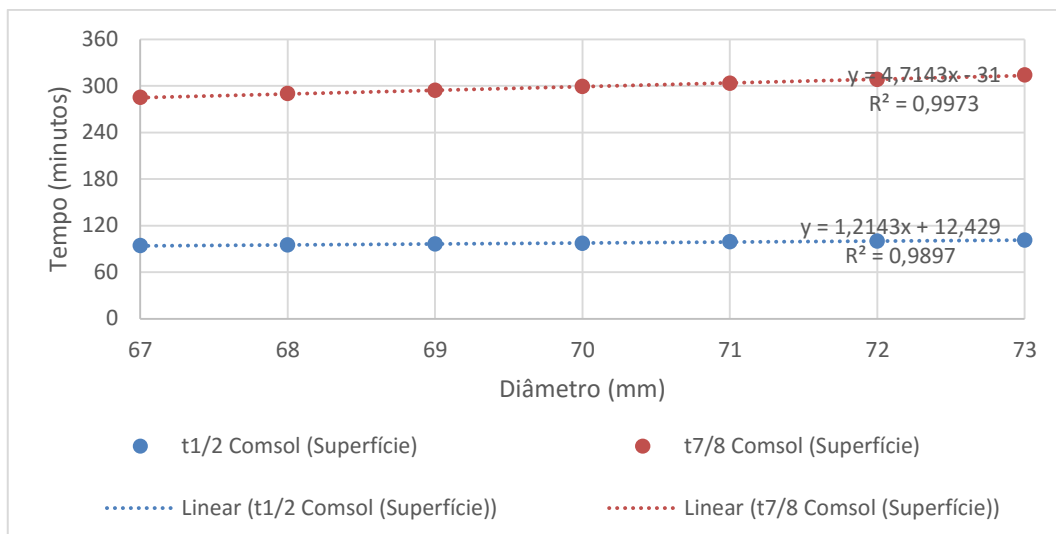


Figura A.14 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre A, Superfície

### A.1.9. Calibre A - Comparação entre núcleo e superfície

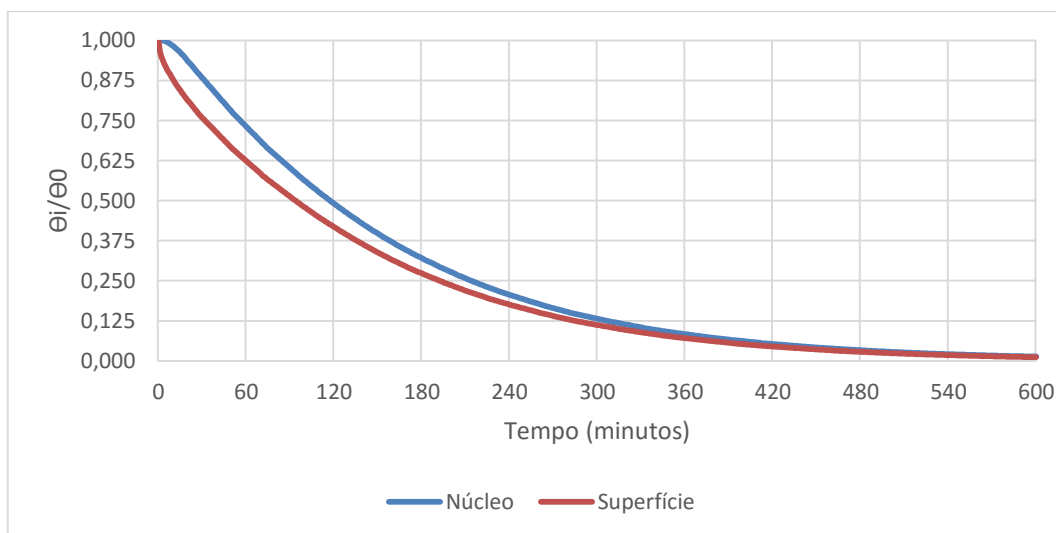


Figura A.15 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 67 mm, Núcleo e Superfície

Tabela A.11 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre A

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
67	117	94	19,6	23
68	119	95	20,1	24
69	121	96	20,6	25
70	124	97	21,7	27
71	126	99	21,4	27
72	128	100	21,8	28
73	130	101	22,3	29

Tabela A.12 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre A

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
67	307	285	7,1	22
68	312	290	7,0	22
69	317	294	7,2	23
70	323	299	7,4	24
71	328	303	7,6	25
72	333	308	7,5	25
73	340	314	7,6	26

### A.1.10. Calibre AA - Núcleo

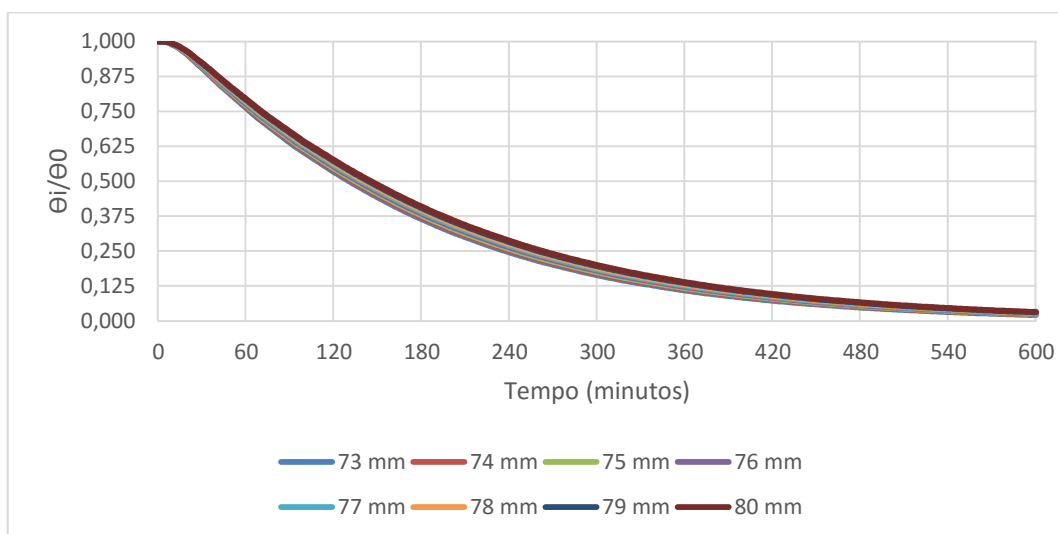


Figura A.16 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AA, Núcleo

Tabela A.13 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre AA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
73	130	340	161,5	210
74	132	345	161,3	213
75	134	351	161,9	217
76	137	356	159,8	219
77	139	361	159,7	222
78	141	366	159,5	225
79	143	372	160,1	229
80	145	377	160,0	232

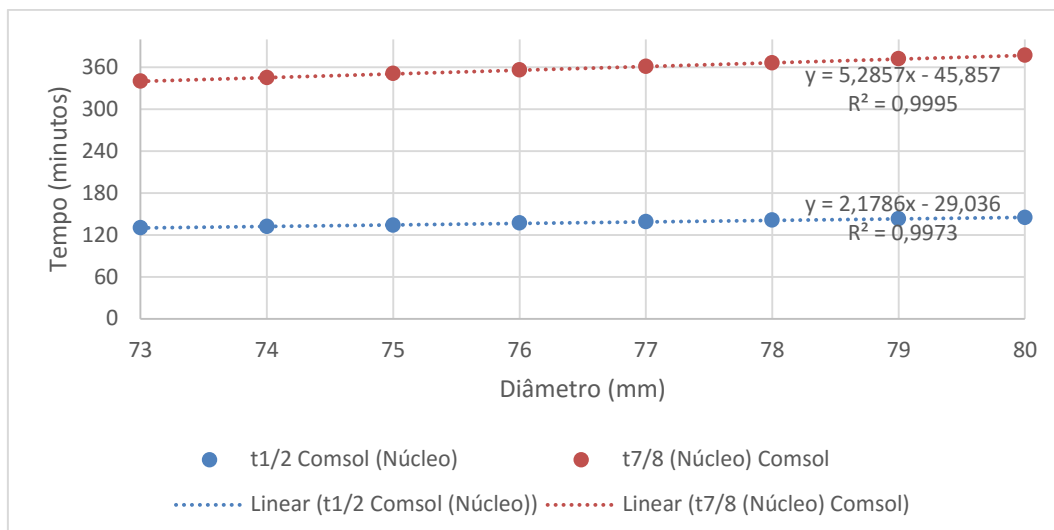


Figura A.17 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AA, Núcleo

### A.1.11. Calibre AA - Superfície

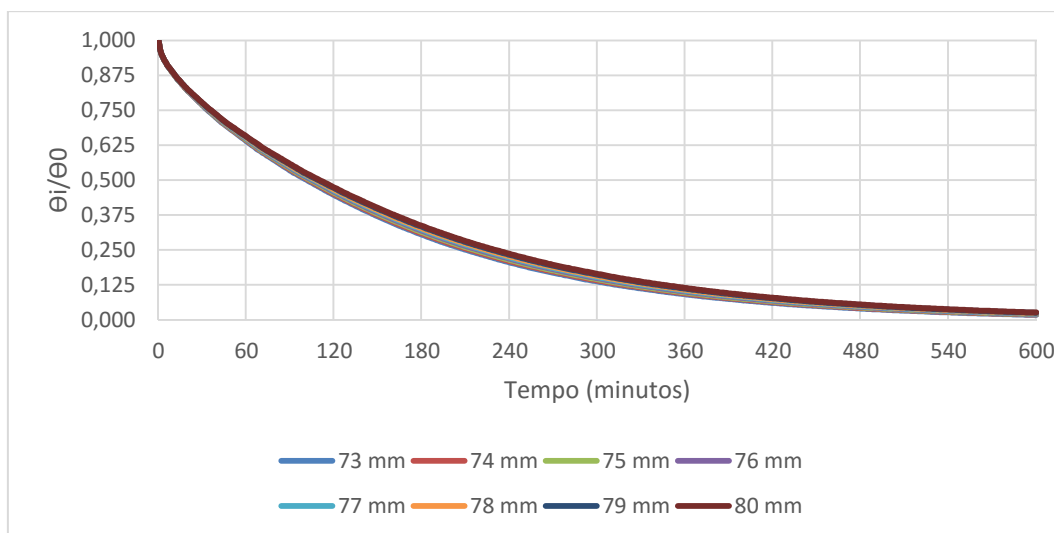


Figura A.18 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AA, Superfície

Tabela A.14 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre AA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
73	101	314	210,8	213
74	103	318	208,7	215
75	104	323	210,5	219
76	105	327	211,4	222
77	106	332	213,2	226
78	108	336	211,1	228
79	109	341	212,8	232
80	110	345	213,6	235

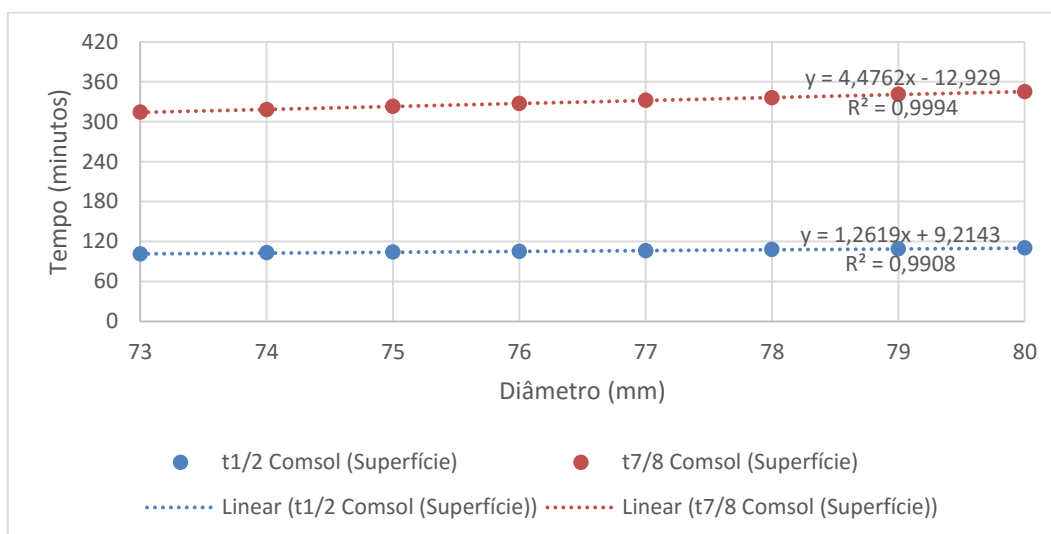


Figura A.19 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AA, Superfície

### A.1.12. Calibre AA - Comparação entre núcleo e superfície

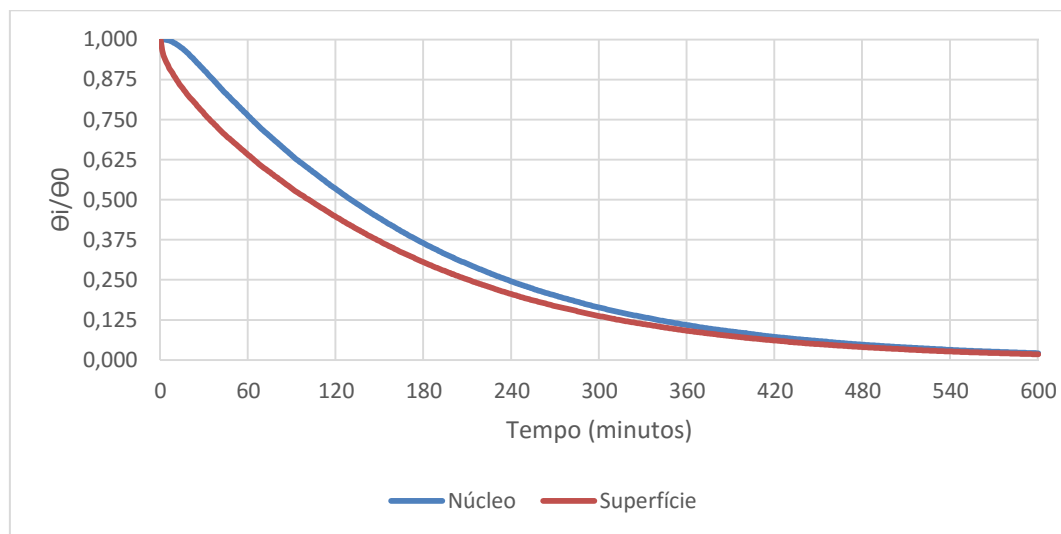


Figura A.20 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 73 mm, Núcleo e Superfície

Tabela A.15 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
73	130	101	22,3	29
74	132	103	21,9	29
75	134	104	22,3	30
76	137	105	23,3	32
77	139	106	23,7	33
78	141	108	23,4	33
79	143	109	23,7	34
80	145	110	24,1	35

Tabela A.16 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AA

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
73	340	314	7,6	26
74	345	318	7,8	27
75	351	323	7,9	28
76	356	327	8,1	29
77	361	332	8,0	29
78	366	336	8,2	30
79	372	341	8,3	31
80	377	345	8,4	32

### A.1.13. Calibre AAA - Núcleo

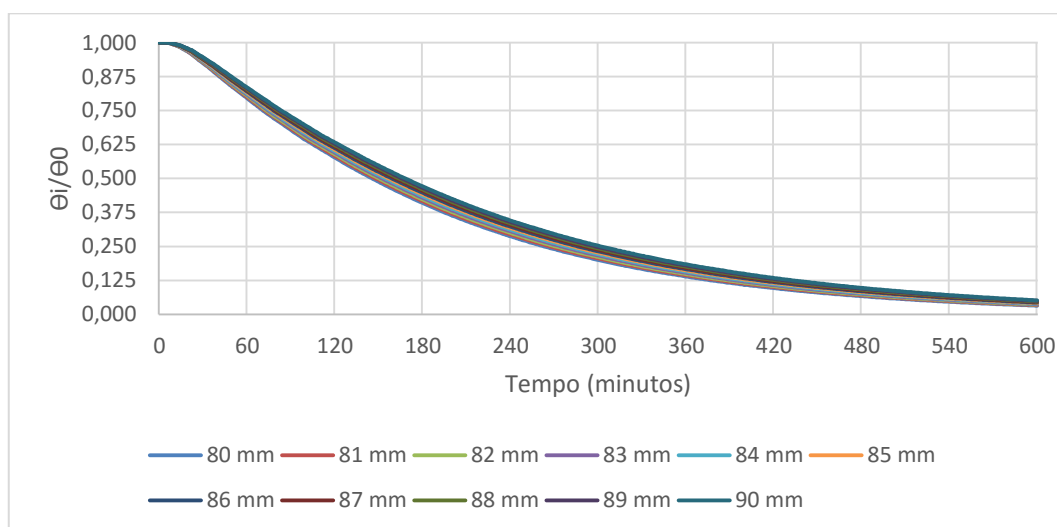


Figura A.21 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAA, Núcleo

Tabela A.17 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre AAA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
80	145	377	160,0	232
81	148	383	158,7	235
82	150	389	159,3	239
83	152	394	159,2	242
84	154	400	159,7	246
85	157	405	157,9	248
86	159	411	158,4	252
87	161	417	159,0	256
88	164	422	157,3	258
89	166	428	157,8	262
90	168	433	157,7	265

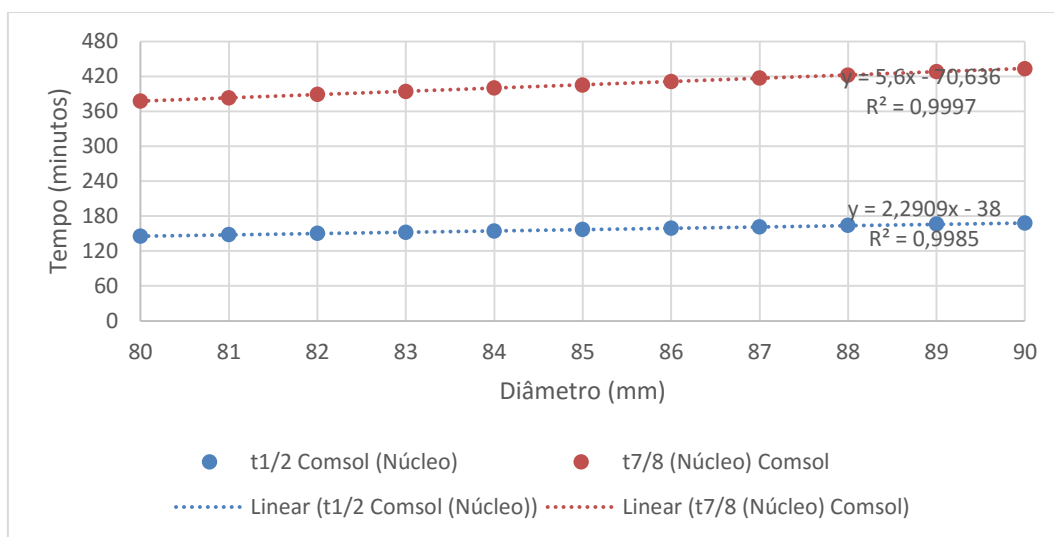


Figura A.22 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAA, Núcleo

### A.1.14. Calibre AAA - Superfície

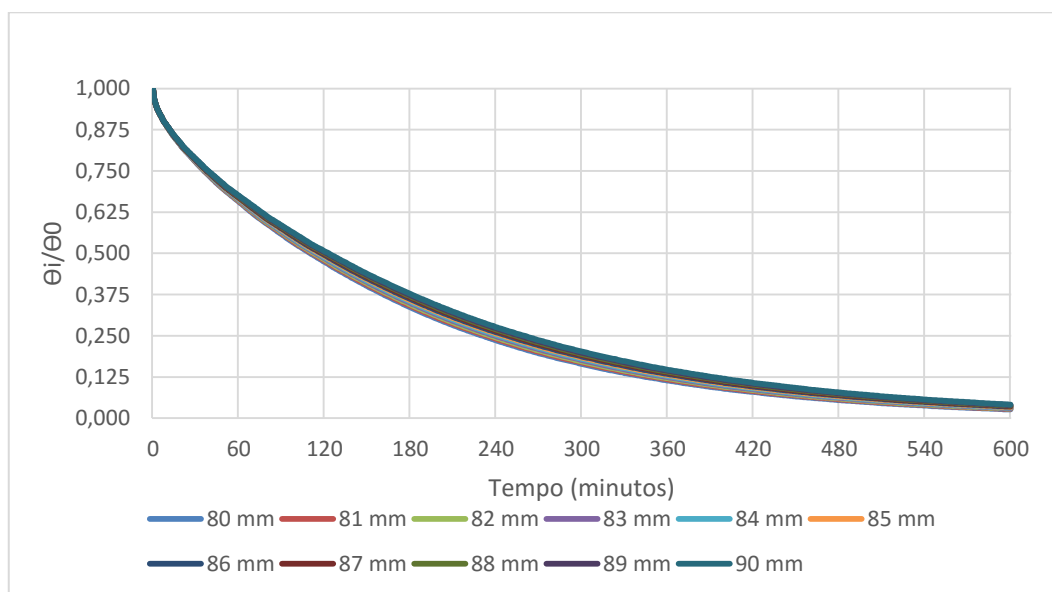


Figura A.23 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAA, Superfície

Tabela A.18 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
80	110	345	213,6	235
81	112	350	212,5	238
82	113	355	214,1	242
83	114	360	215,7	246
84	115	364	216,5	249
85	117	369	215,3	252
86	118	373	216,1	255
87	119	378	217,6	259
88	120	383	219,1	263
89	122	387	217,2	265
90	123	391	217,8	268

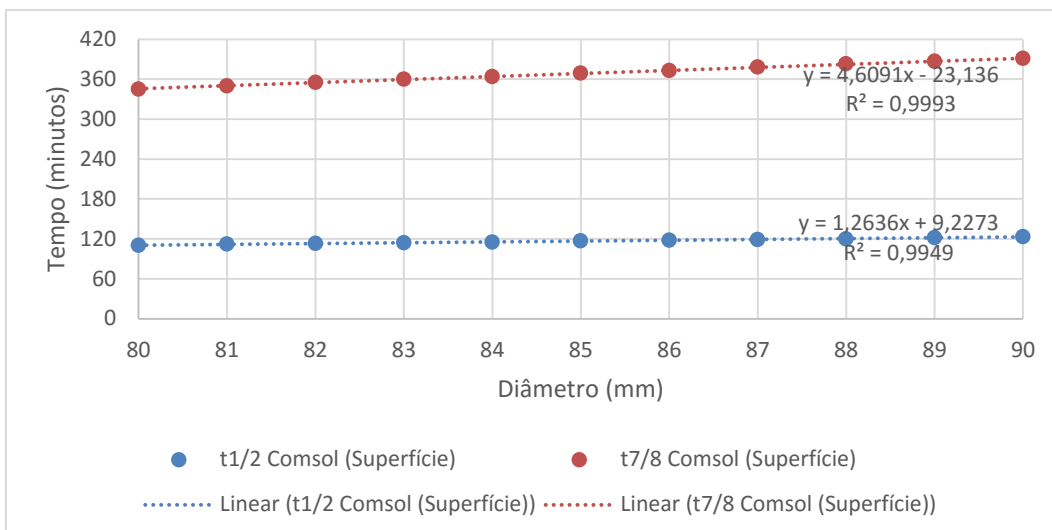


Figura A.24 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAA, Superfície

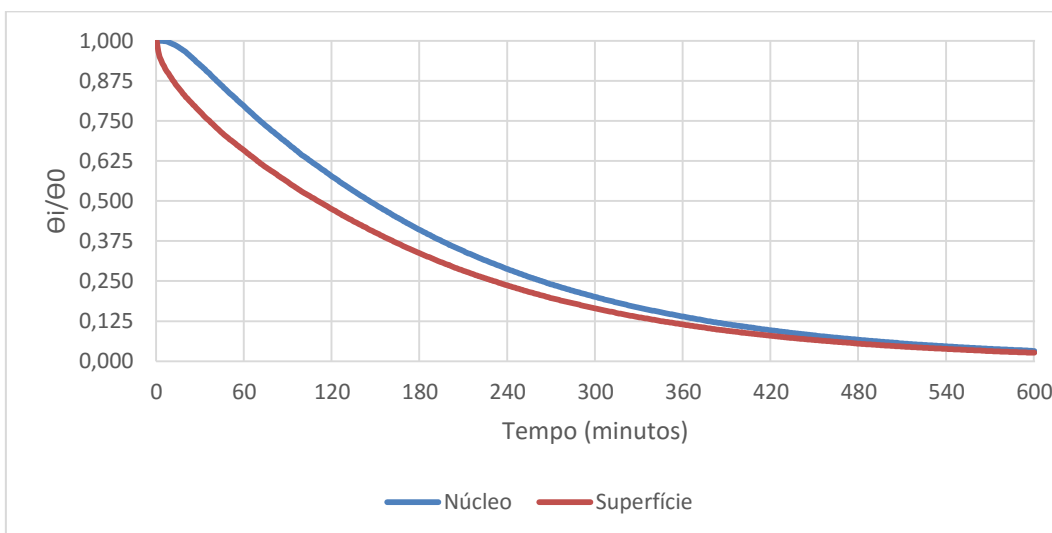


Figura A.25 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 80 mm, Núcleo e Superfície

Tabela A.19 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
80	145	110	24,1	35
81	148	112	24,3	36
82	150	113	24,6	37
83	152	114	25,0	38
84	154	115	25,3	39
85	157	117	25,4	40
86	159	118	25,7	41
87	161	119	26,0	42
88	164	120	26,8	44
89	166	122	26,5	44
90	168	123	26,7	45

Tabela A.20 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAA

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
80	377	345	8,4	32
81	383	350	8,6	33
82	389	355	8,7	34
83	394	360	8,6	34
84	400	364	9,0	36
85	405	369	8,8	36
86	411	373	9,2	38
87	417	378	9,3	39
88	422	383	9,2	39
89	428	387	9,5	41
90	433	391	9,7	42

### A.1.15. Calibre AAAA - Núcleo

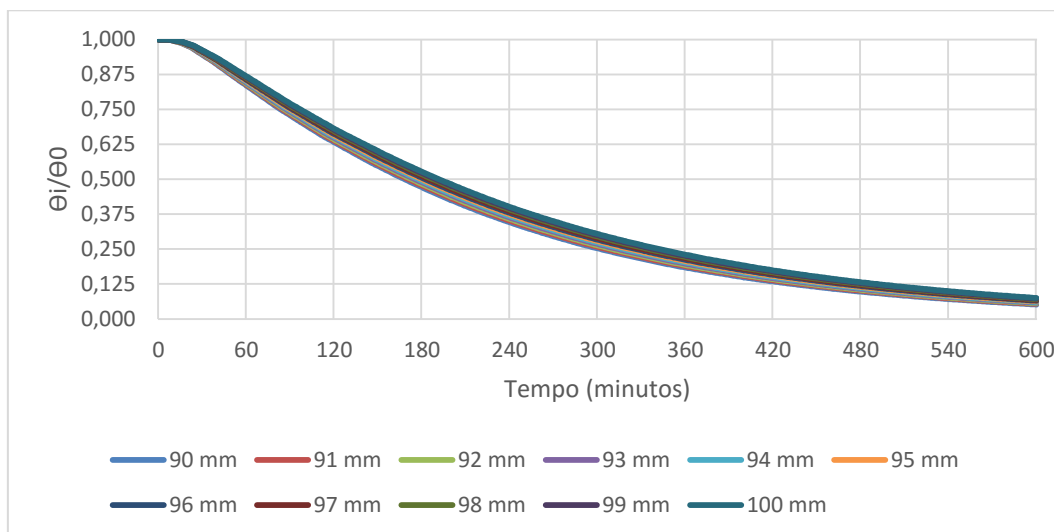


Figura A.26 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAAA, Núcleo

Tabela A.21 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre AAAA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
90	168	433	157,7	265
91	171	439	156,3	268
92	173	445	157,3	272
93	175	451	157,1	276
94	177	456	157,3	279
95	180	462	156,7	282
96	182	468	157,4	286
97	185	474	156,2	289
98	187	480	156,8	293
99	190	485	155,6	295
100	192	491	155,3	299

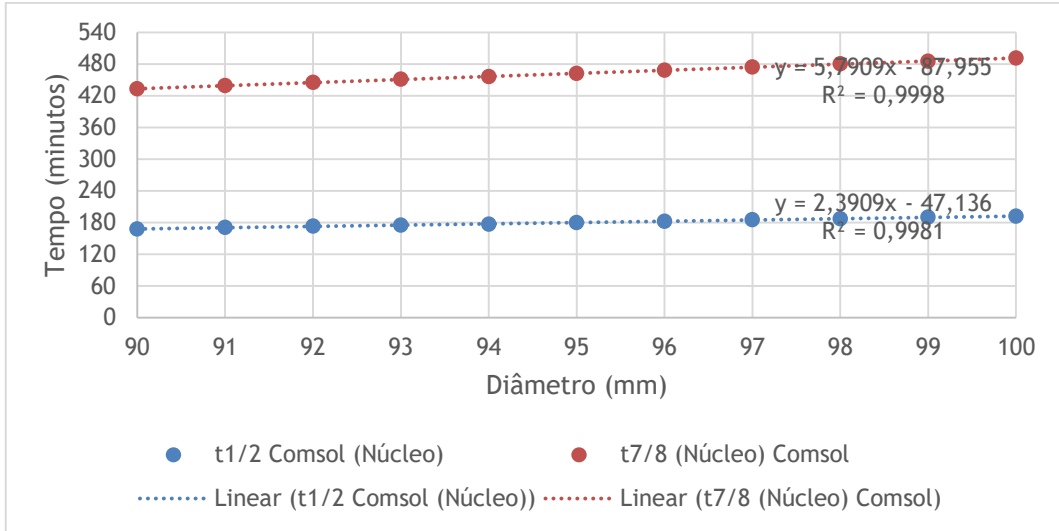


Figura A.27 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAAA, Núcleo

### A.1.16. Calibre AAAA - Superfície

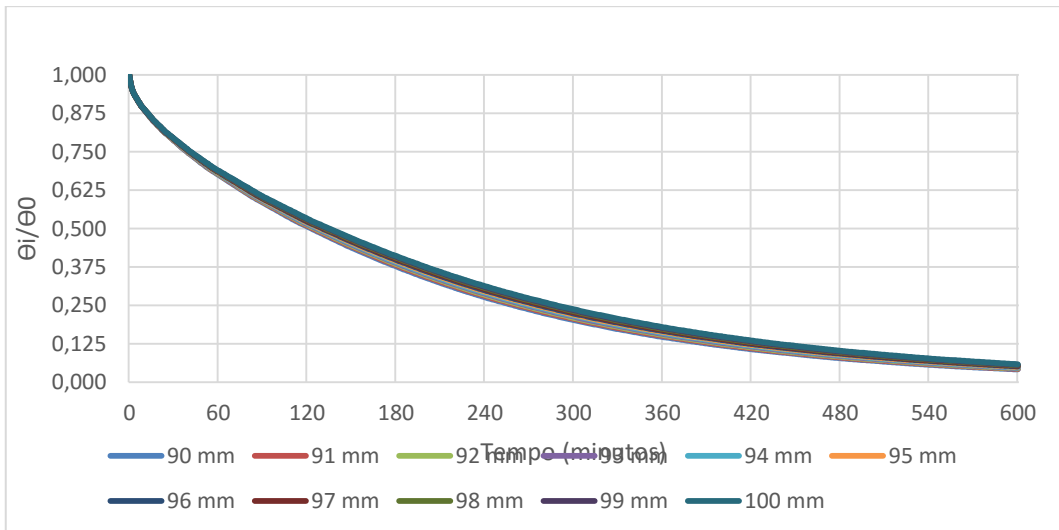


Figura A.28 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAAA, Superfície

Tabela A.22 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
90	123	391	217,8	268
91	124	396	219,5	272
92	126	401	218,5	275
93	127	405	218,0	278
94	128	410	220,1	282
95	129	415	221,1	286
96	130	419	222,1	289
97	132	424	221,1	292
98	133	429	222,6	296
99	134	433	223,3	299
100	135	438	224,4	303

partir do COMSOL, Superfície, Calibre AAAA

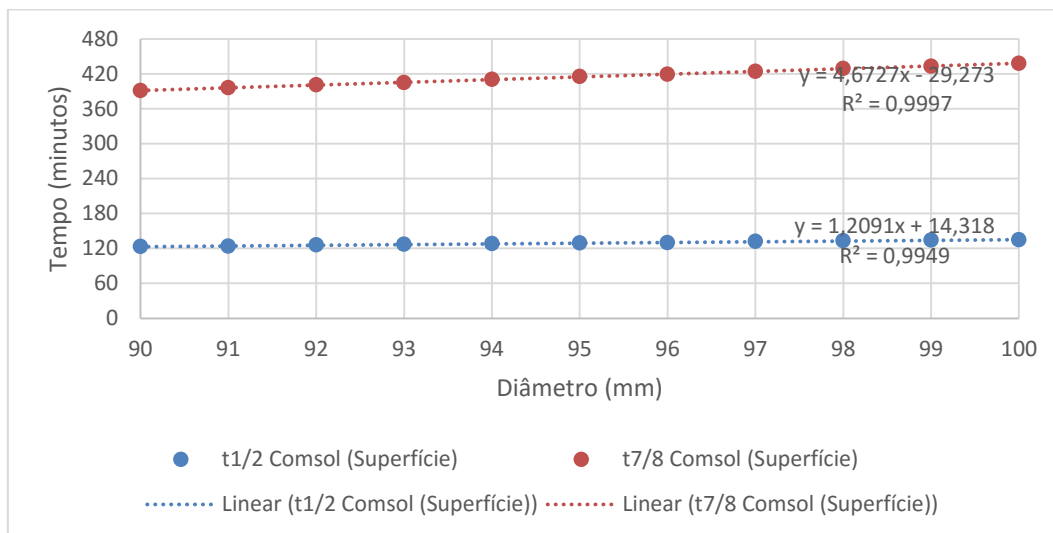


Figura A.29 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAAA, Superfície

### A.1.17. Calibre AAAA - Comparação entre o núcleo e superfície

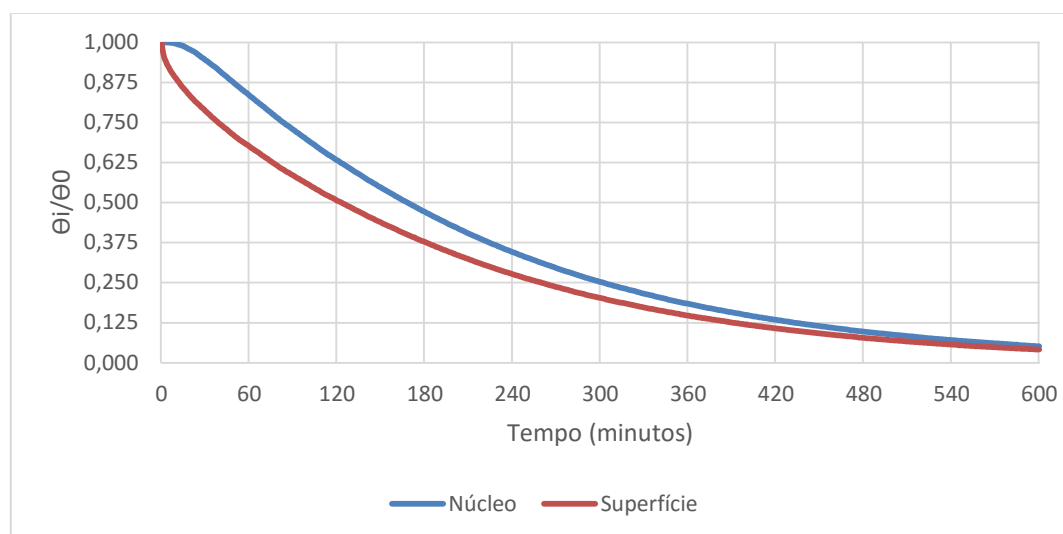


Figura A.30 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 90 mm, Núcleo e Superfície

Tabela A.23 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAAA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	Δ Núcleo e Superfície (%)	Δ Núcleo e Superfície (min)
90	168	123	26,7	45
91	171	124	27,4	47
92	173	126	27,1	47
93	175	127	27,4	48
94	177	128	27,6	49
95	180	129	28,3	51
96	182	130	28,5	52
97	185	132	28,6	53
98	187	133	28,8	54
99	190	134	29,4	56
100	192	135	29,6	57

Tabela A.24 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAAA

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
90	433	391	9,7	42
91	439	396	9,7	43
92	445	401	9,8	44
93	451	405	10,0	46
94	456	410	10,9	46
95	462	415	10,7	47
96	468	419	10,4	49
97	474	424	10,5	50
98	480	429	10,6	51
99	485	433	10,7	52
100	491	438	10,7	53

## A.2 Refrigeração a água

Representam-se os dados obtidos para o caso de refrigeração a água. Apresentar-se-ão primeiramente os dados obtidos para o núcleo, depois para a superfície, e por último a comparação entre os dois para o primeiro diâmetro de cada calibre.

### A.2.1. Calibre C - Núcleo

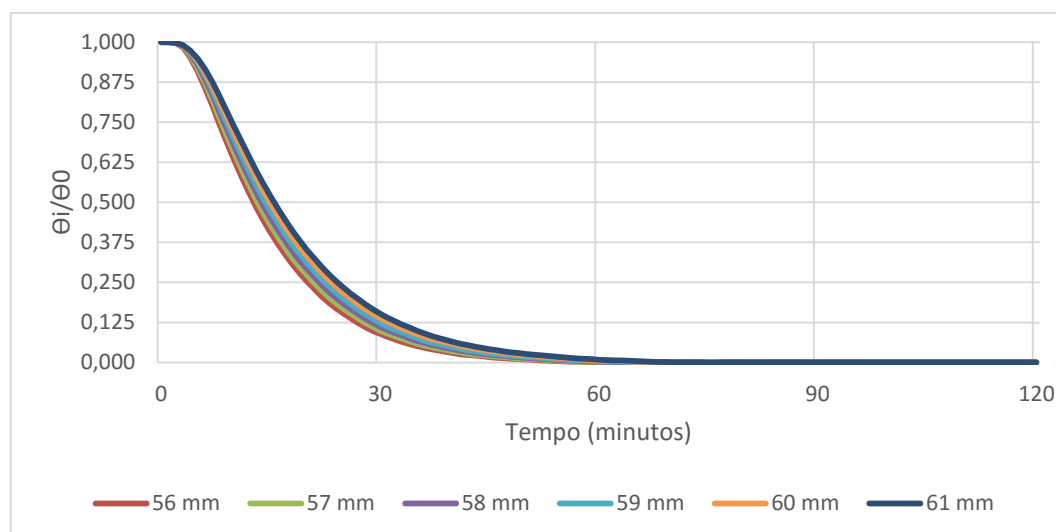


Figura A.31 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre C, Núcleo

Tabela A.25 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre C

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
56	13	27	107,6	14,0
57	13	28	115,8	15,0
58	14	29	107,1	15,0
59	14	30	114,2	16,0
60	15	31	106,6	16,0
61	15	32	113,3	17,0

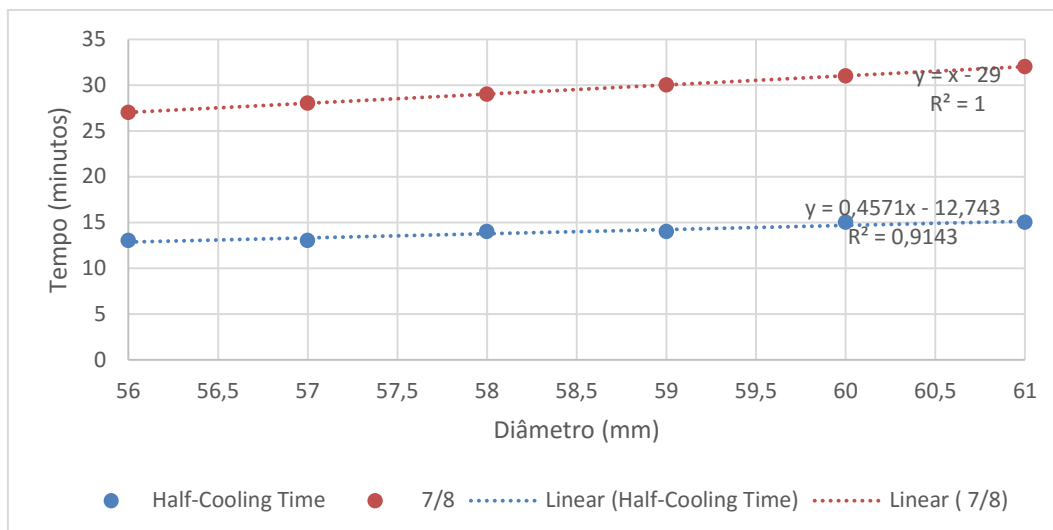


Figura A.32 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre C, Núcleo

### A.2.2. Calibre C - Superfície

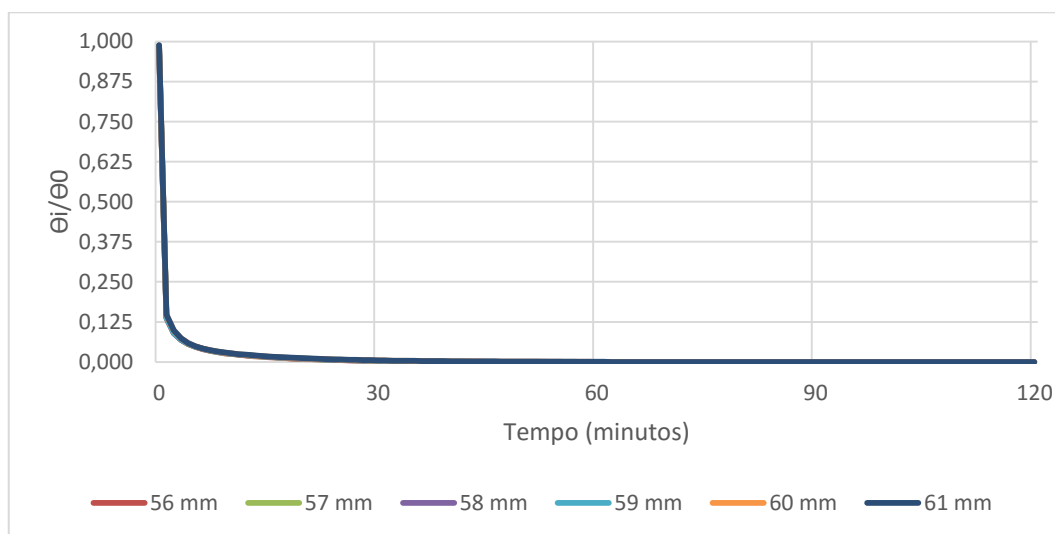


Figura A.33 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre C, Superfície

Tabela A.26 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre C

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
56	3	75	2400,0	72
57	3	75	2400,0	72
58	3	76	2433,3	73
59	3	76	2433,3	73
60	3	77	2466,6	74
61	3	77	2466,6	74

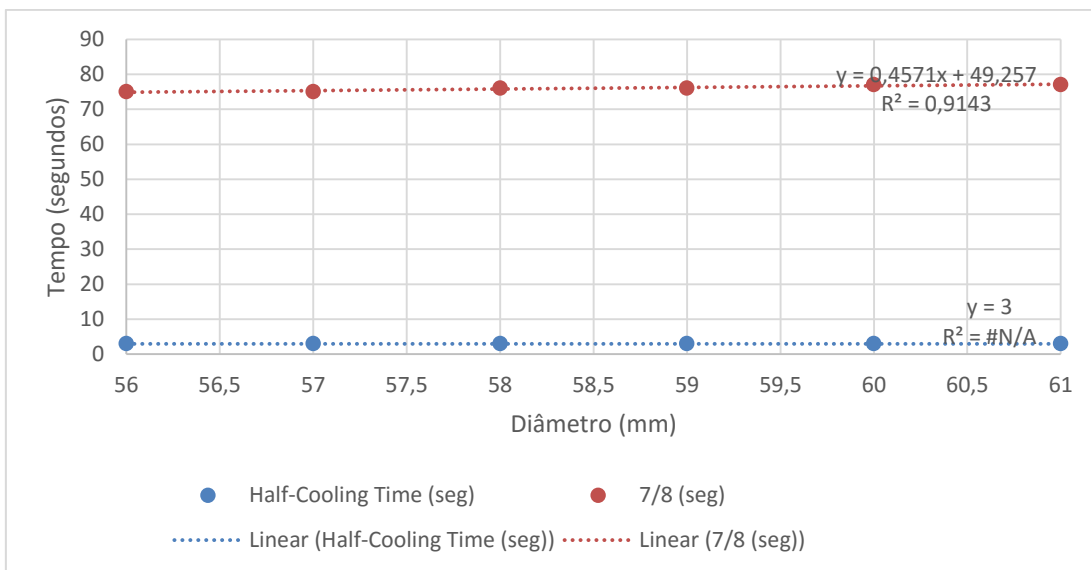


Figura A.34 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre C, Superfície

### A.2.3. Calibre C - Comparação entre núcleo e superfície

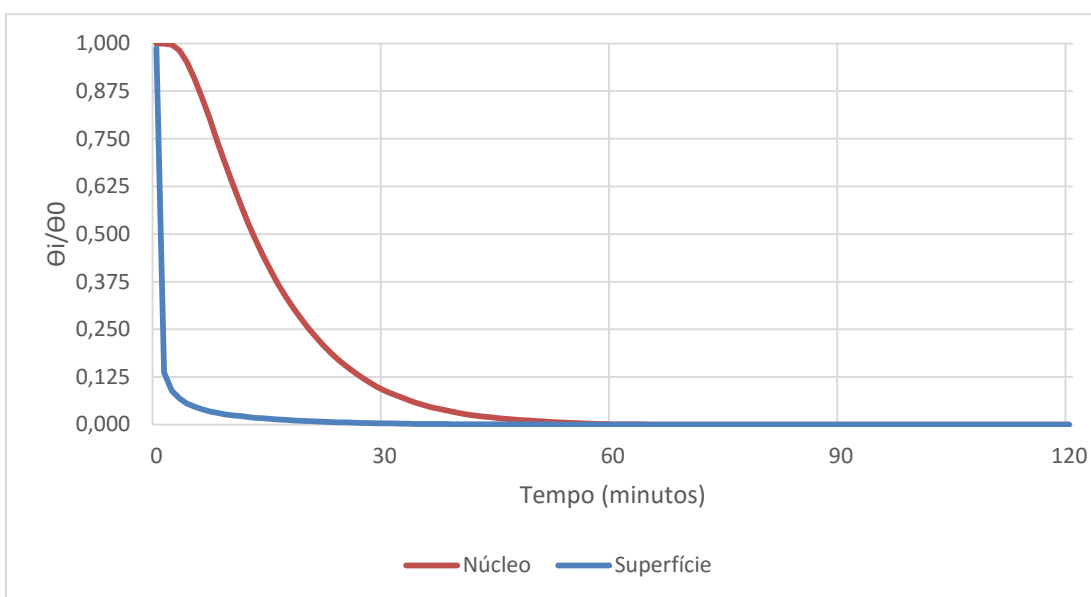


Figura A.35 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 56 mm, Núcleo e Superfície

Tabela A.27 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre C

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
56	13	0,05	99,6	12,95
57	13	0,05	99,6	12,95
58	14	0,05	99,6	13,95
59	14	0,05	99,6	13,95
60	15	0,05	99,6	14,95
61	15	0,05	99,6	14,95

Tabela A.28 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre C

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
56	27	1,25	95,3	25,75
57	28	1,25	95,5	26,75
58	29	1,27	95,6	27,73
59	30	1,27	95,7	28,73
60	31	1,28	95,8	29,72
61	32	1,28	95,9	30,72

### A.2.4. Calibre B - Núcleo

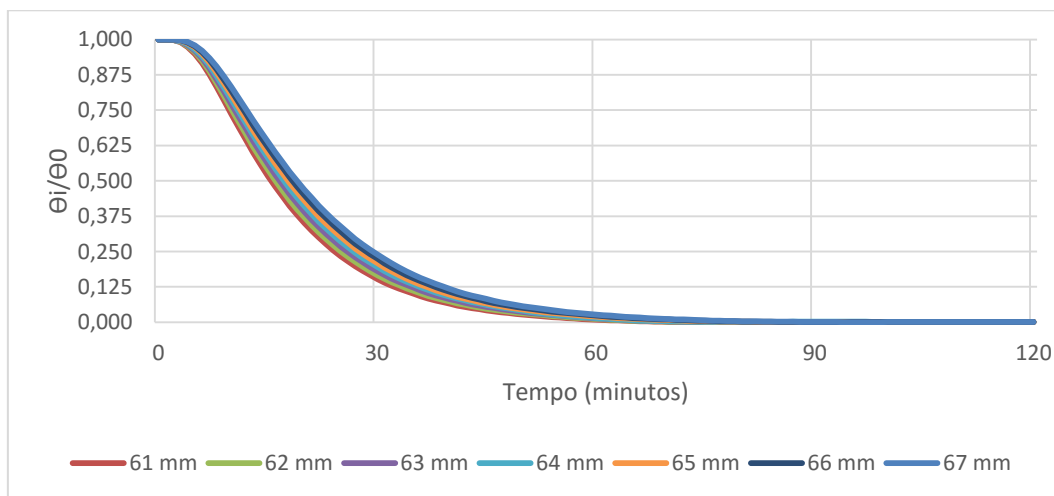


Figura A.36 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre B, Núcleo

Tabela A.29 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre B

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
61	15	32	113,3	17
62	16	34	112,5	18
63	17	35	105,8	18
64	17	36	111,7	19
65	18	37	105,5	19
66	18	38	111,1	20
67	19	39	105,2	20

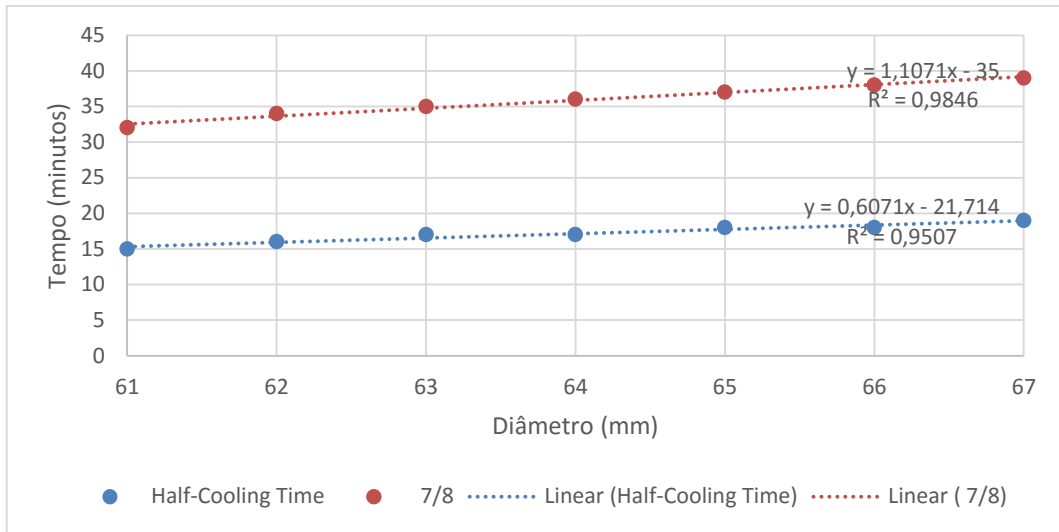


Figura A.37 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre B, Núcleo

### A.2.5. Calibre B - Superfície

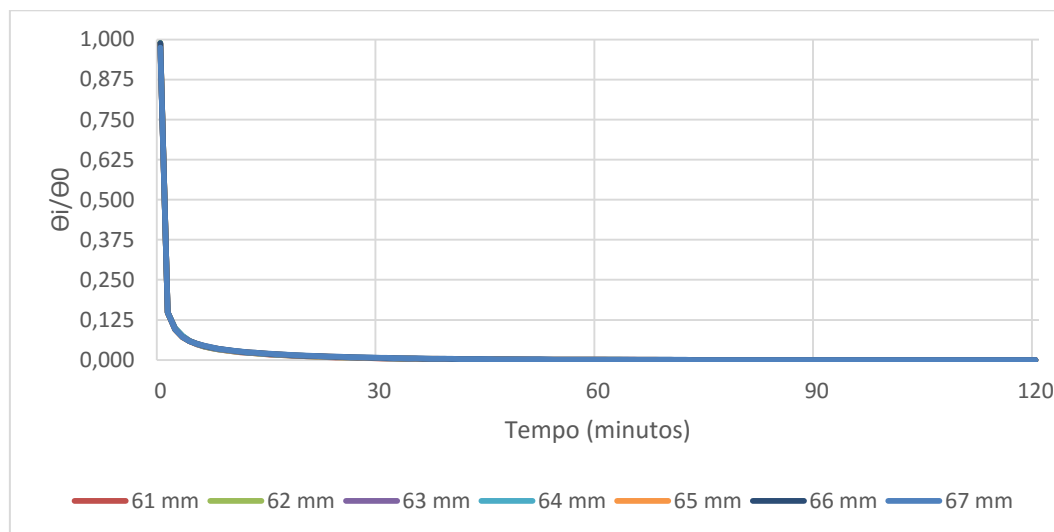


Figura A.38 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre B, Superfície

Tabela A.30 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre B

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
61	3	77	2466,6	74
62	3	78	2500,0	75
63	3	78	2500,0	75
64	3	79	2533,3	76
65	3	79	2533,3	76
66	3	79	2533,3	76
67	3	80	2566,6	77

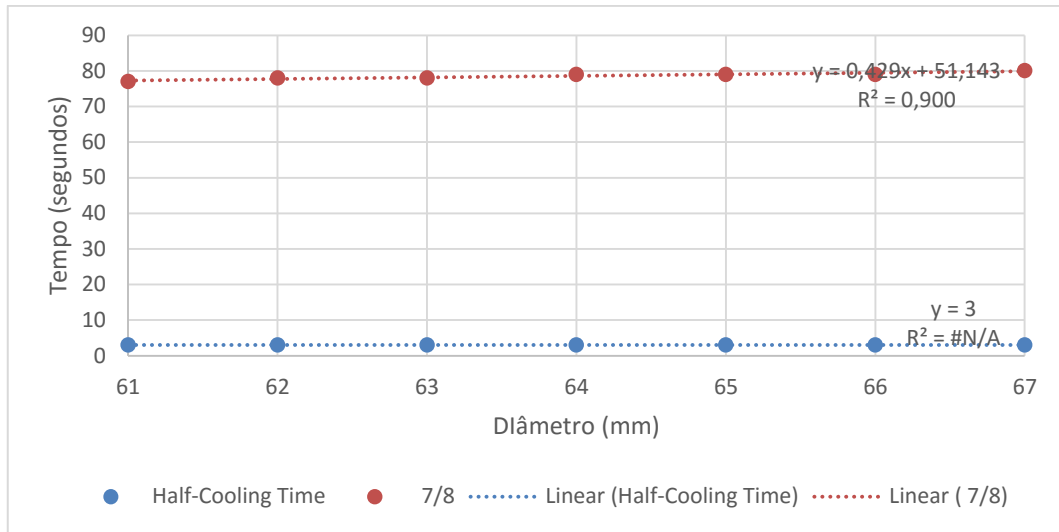


Figura A.39 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre B, Superfície

### A.2.6. Calibre B - Comparação entre núcleo e superfície

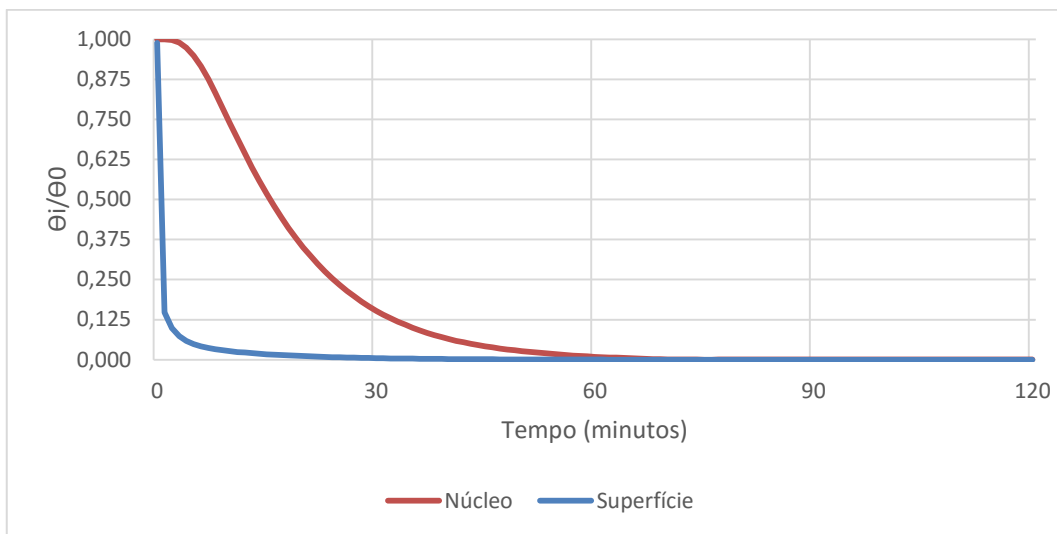


Figura A.40 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 61mm, Núcleo e Superfície

Tabela A.31 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre B

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
61	15	0,05	99,6	14,95
62	16	0,05	99,6	15,95
63	17	0,05	99,7	16,95
64	17	0,05	99,7	16,95
65	18	0,05	99,7	17,95
66	18	0,05	99,7	17,95
67	19	0,05	99,7	18,95

Tabela A.32 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre B

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
61	32	1,28	95,9	30,7
62	34	1,30	96,1	32,7
63	35	1,30	96,2	33,7
64	36	1,32	96,3	34,6
65	37	1,32	96,4	35,6
66	38	1,32	96,5	36,6
67	39	1,33	96,8	37,6

### A.2.7. Calibre A - Núcleo

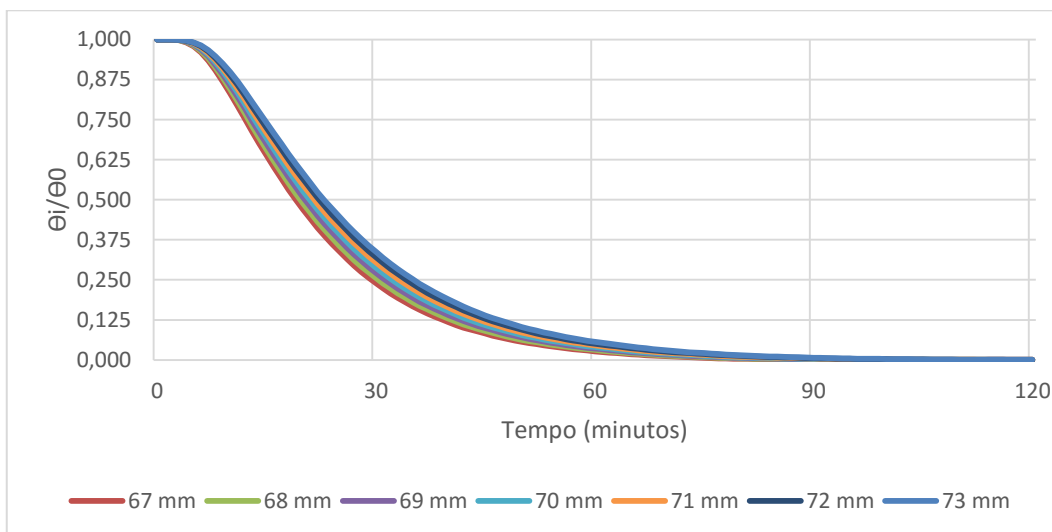


Figura A.41 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre A, Núcleo

Tabela A.33 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre A

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
67	19	39	105,2	20
68	20	40	100,0	20
69	20	42	110,0	22
70	21	43	104,7	22
71	22	44	100,0	22
72	22	45	104,5	23
73	23	47	104,3	24

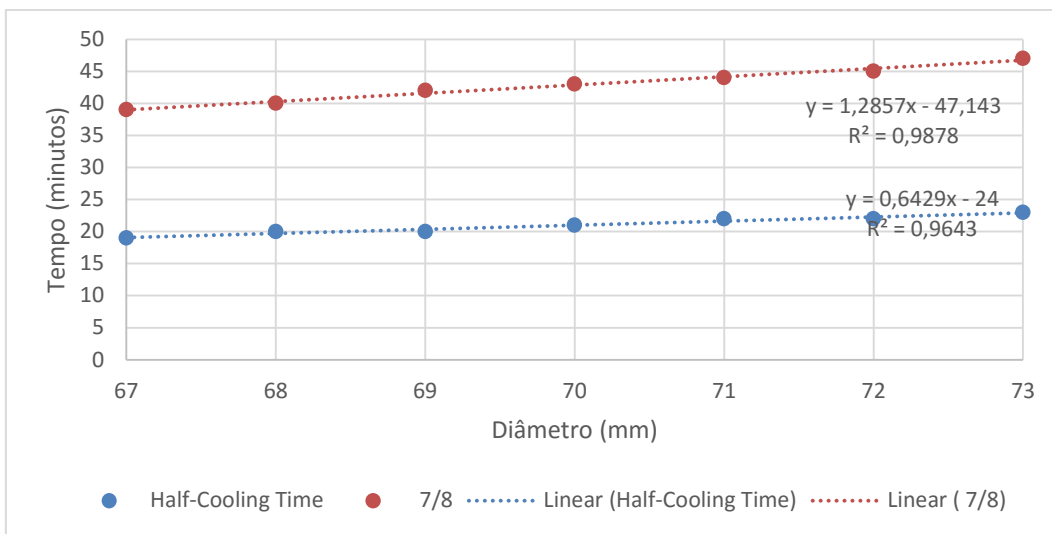


Figura A.42 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre A, Núcleo

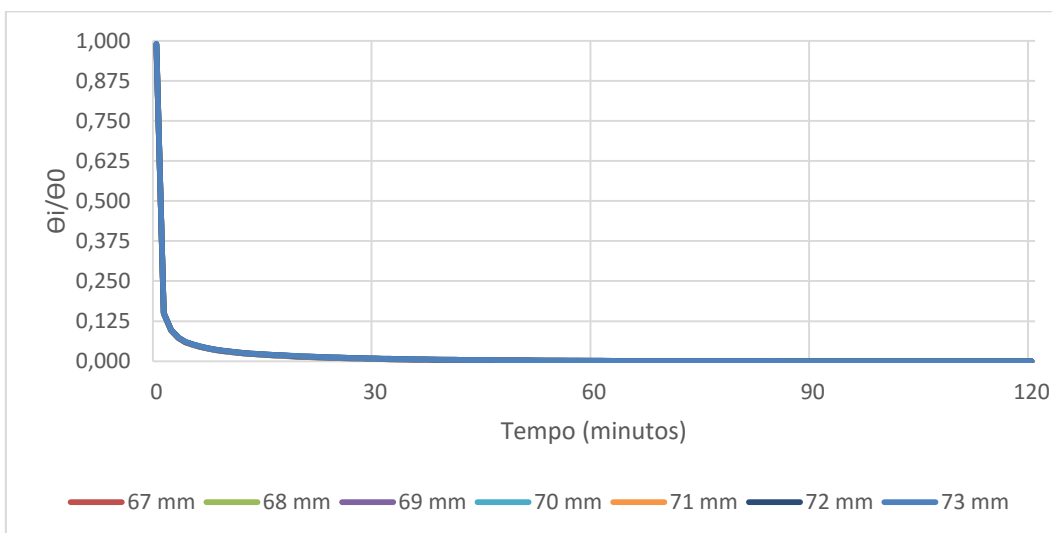


Figura A.43 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre A, Superfície

Tabela A.34 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre A

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
67	3	80	2566,6	77
68	3	78	2500,0	75
69	3	80	2566,6	77
70	3	80	2566,6	77
71	3	81	2600,0	78
72	3	81	2600,0	78
73	3	82	2633,3	79

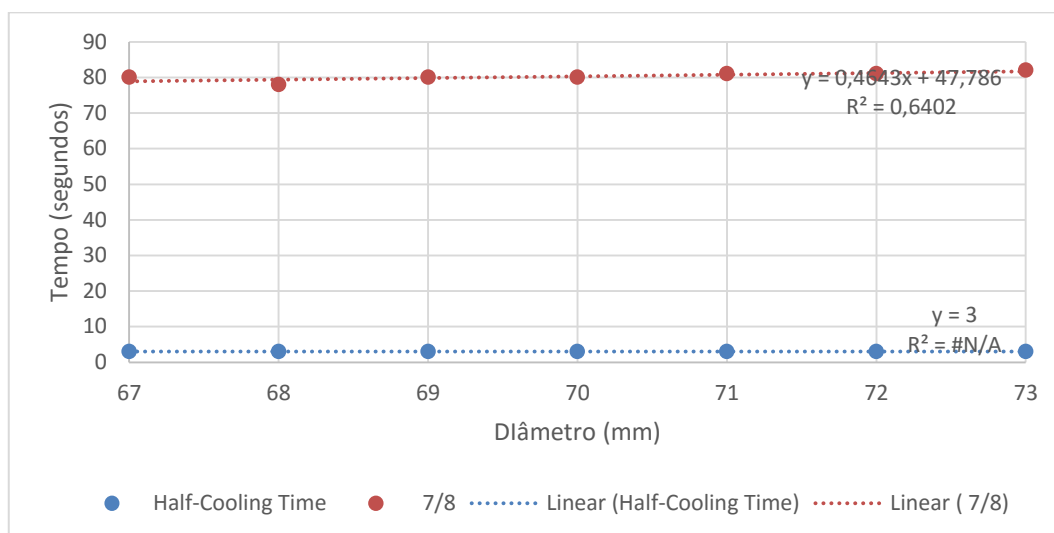


Figura A.44 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre A, Superfície

### A.2.8. Calibre A - Comparação entre núcleo e superfície

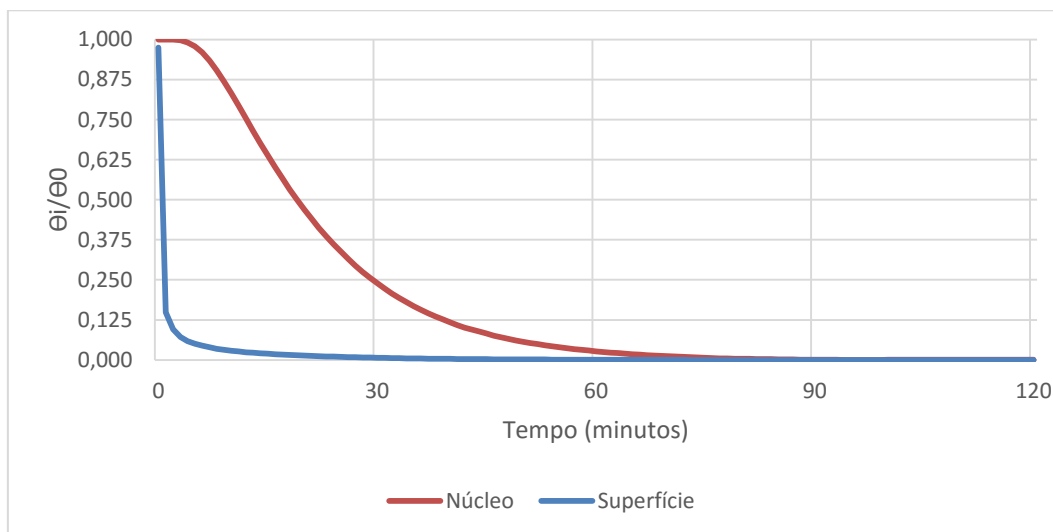


Figura A.45 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 67 mm, Núcleo e Superfície

Tabela A.35 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre A

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
67	19	0,05	99,7	18,95
68	20	0,05	99,7	19,95
69	20	0,05	99,7	19,95
70	21	0,05	99,7	20,95
71	22	0,05	99,7	21,95
72	22	0,05	99,7	21,95
73	23	0,05	99,7	22,95

Tabela A.36 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre A

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
67	39	1,33	96,5	37,6
68	40	1,30	96,7	38,7
69	42	1,33	96,8	40,6
70	43	1,33	96,9	41,6
71	44	1,35	96,9	42,6
72	45	1,35	97,0	43,6
73	47	1,37	97,0	45,6

### A.2.9. Calibre AA - Núcleo

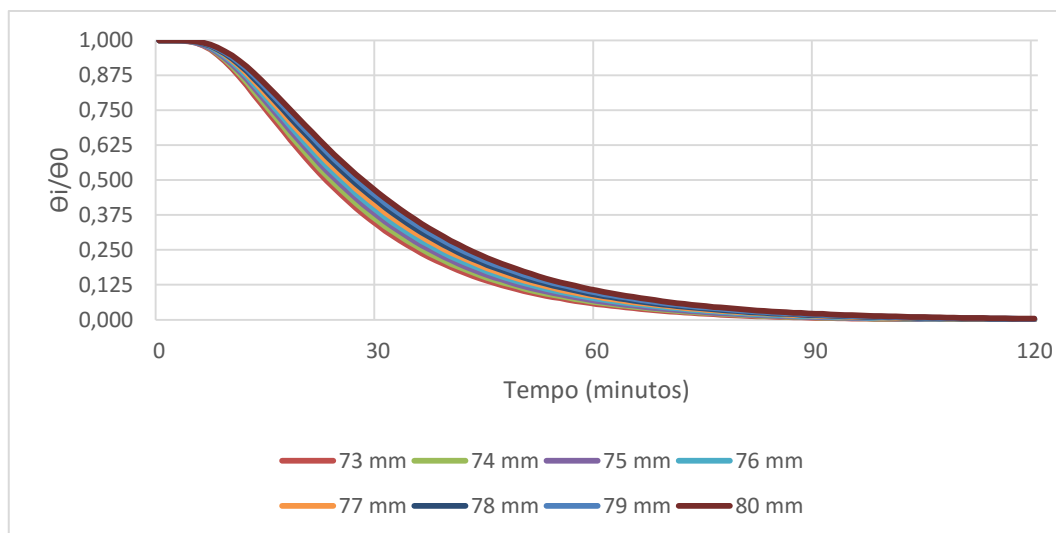


Figura A.46 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AA, Núcleo

Tabela A.37 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre AA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
73	23	47	104,3	24
74	24	48	100,0	24
75	24	49	104,1	25
76	25	51	104,0	26
77	26	52	100,0	26
78	26	54	107,6	28
79	27	55	103,7	28
80	28	56	100,0	28

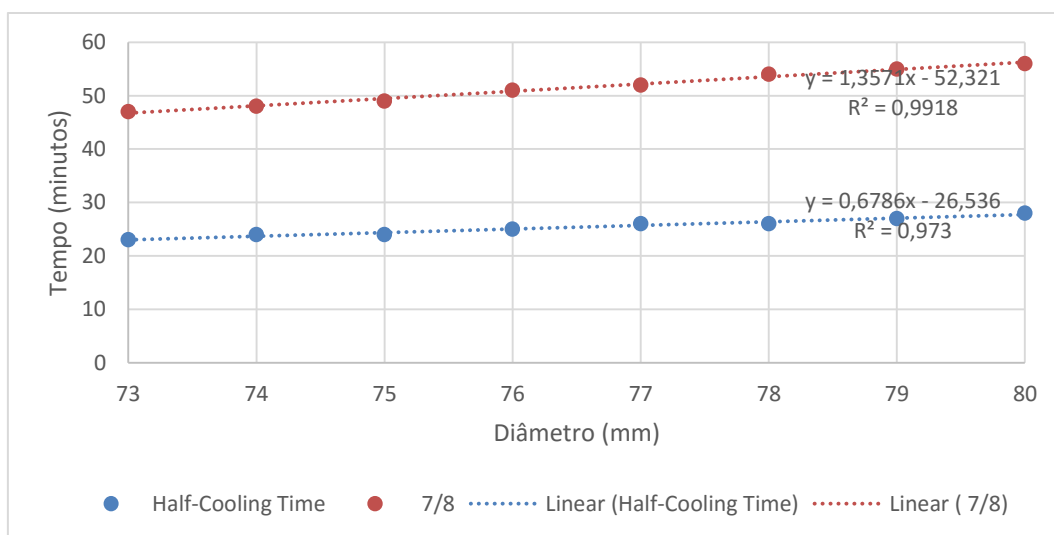


Figura A.47 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AA, Núcleo

### A.2.10. Calibre AA - Superfície

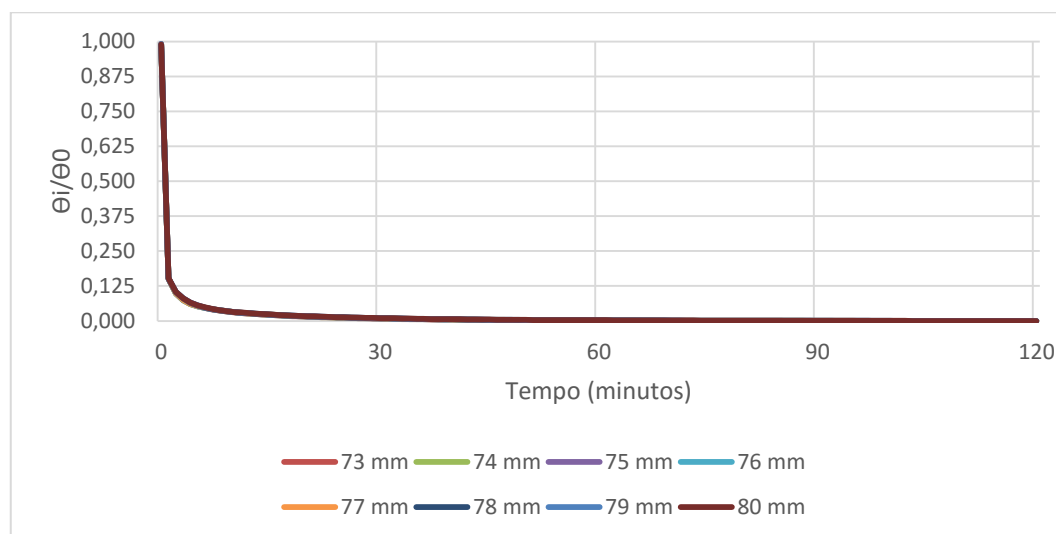


Figura A.48 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AA, Superfície

Tabela A.38 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
73	3	82	2633,3	79
74	3	82	2633,3	79
75	3	82	2633,3	79
76	3	82	2633,3	79
77	3	83	2666,6	80
78	3	83	2666,6	80
79	3	83	2666,6	80
80	3	83	2666,6	80

partir do COMSOL, Superfície, Calibre AA

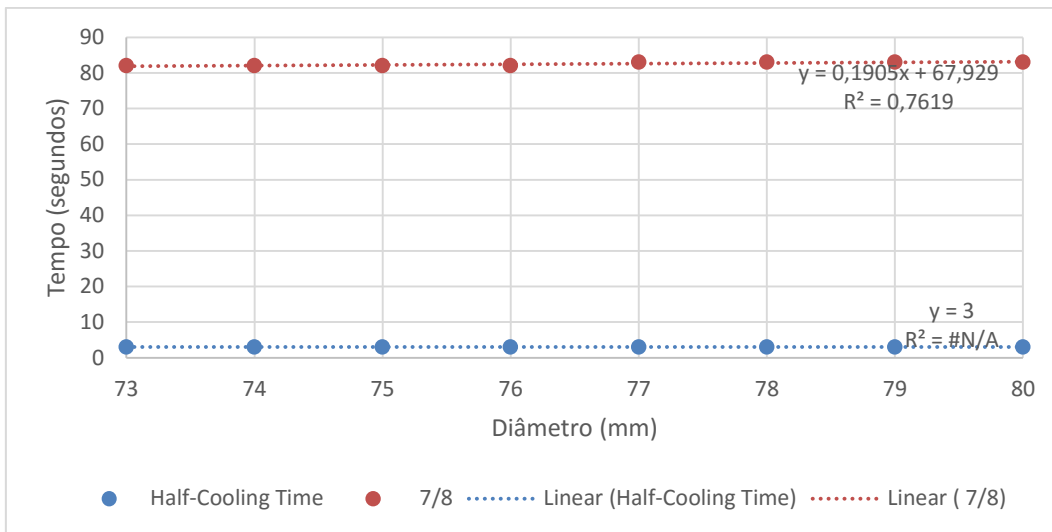


Figura A.49 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AA, Superfície

### A.2.11. Calibre AA - Comparação entre núcleo e superfície

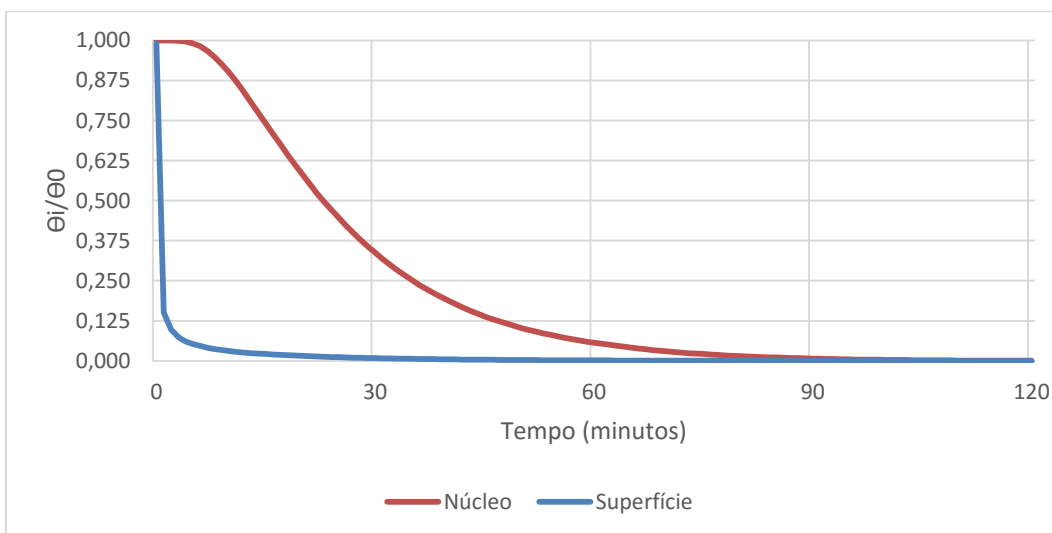


Figura A.50 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 73mm, Núcleo e Superfície

Tabela A.39 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
73	23	0,05	99,7	22,95
74	24	0,05	99,7	23,95
75	24	0,05	99,7	23,95
76	25	0,05	99,8	24,95
77	26	0,05	99,8	25,95
78	26	0,05	99,8	25,95
79	27	0,05	99,8	26,95
80	28	0,05	99,8	27,95

Tabela A.40- Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AA

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
73	47	1,37	97,0	45,6
74	48	1,37	97,1	46,6
75	49	1,37	97,2	47,6
76	51	1,37	97,3	49,6
77	52	1,38	97,3	50,6
78	54	1,38	97,4	52,6
79	55	1,38	97,4	53,6
80	56	1,38	97,5	54,6

### A.2.12. Calibre AAA - Núcleo

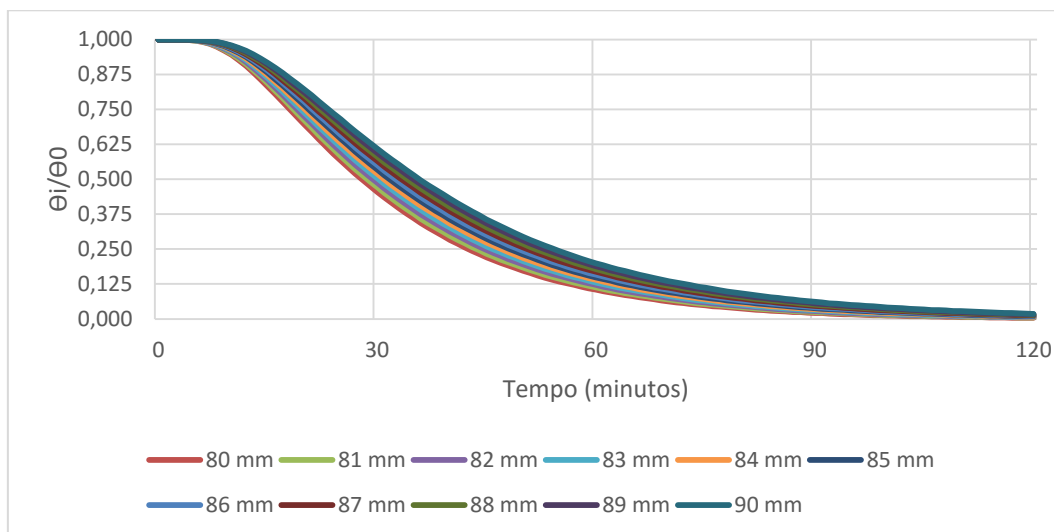


Figura A.51 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAA, Núcleo

Tabela A.41 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre AAA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
80	28	56	100,0	28
81	29	58	100,0	29
82	29	59	103,5	30
83	30	61	103,3	31
84	31	62	100,0	31
85	32	64	100,0	32
86	33	65	96,9	32
87	33	67	103,0	34
88	34	69	102,9	35
89	35	70	100,0	35
90	36	72	100,0	36

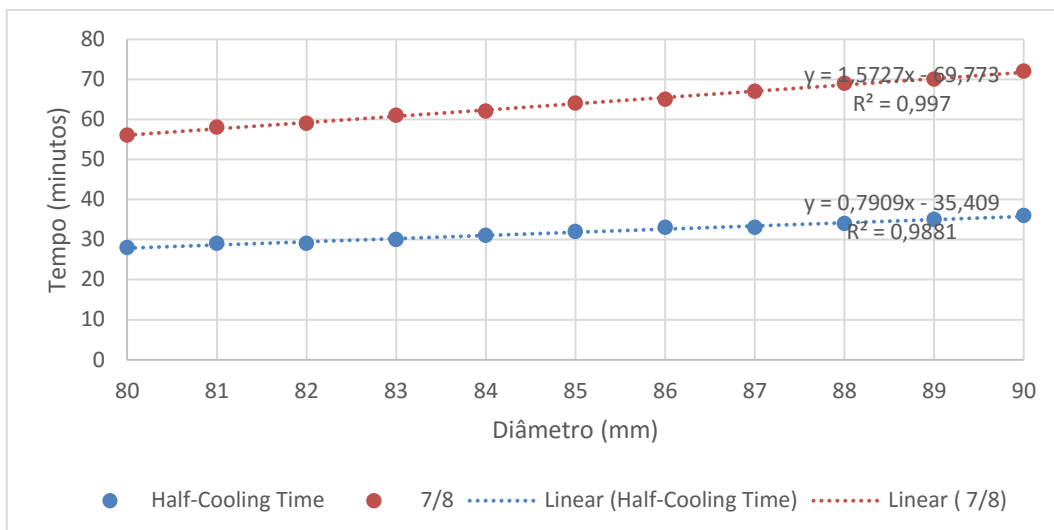


Figura A.52 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAA, Núcleo

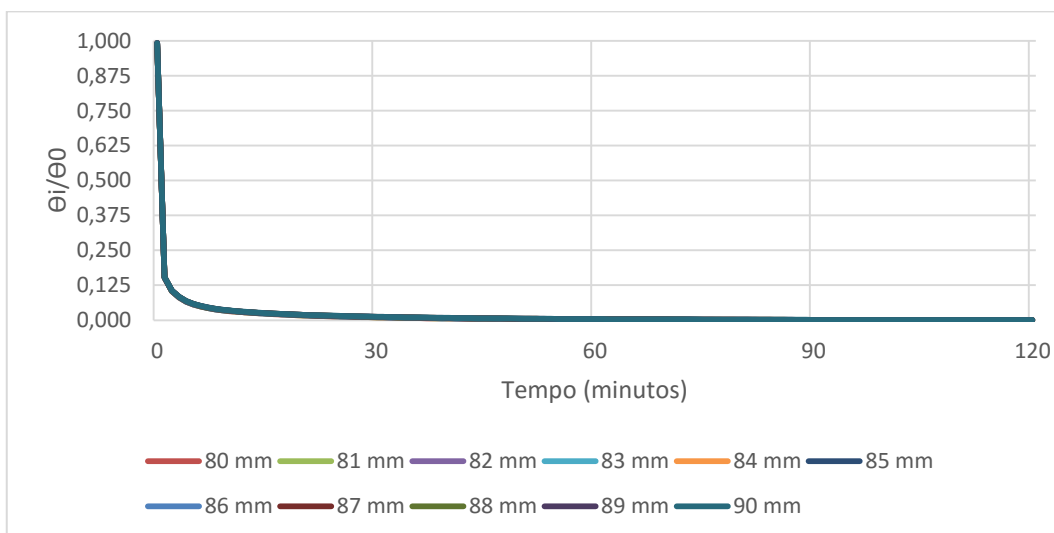


Figura A.53 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAA, Superfície

Tabela A.42 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Superfície, Calibre AAA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
80	3	83	2666,6	80
81	3	84	2700,0	81
82	3	84	2700,0	81
83	3	84	2700,0	81
84	3	84	2700,0	81
85	3	85	2733,3	82
86	3	85	2733,3	82
87	3	85	2733,3	82
88	3	85	2733,3	82
89	3	85	2733,3	82
90	3	86	2766,7	83

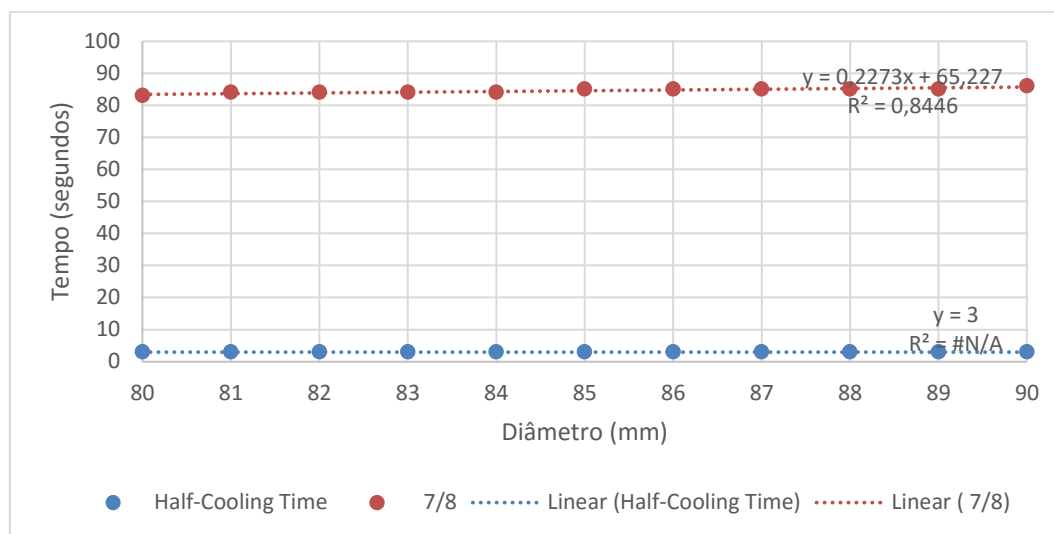


Figura A.54 - Half-Cooling e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAA, Superfície

### A.2.13. Calibre AAA - Comparação entre núcleo e superfície

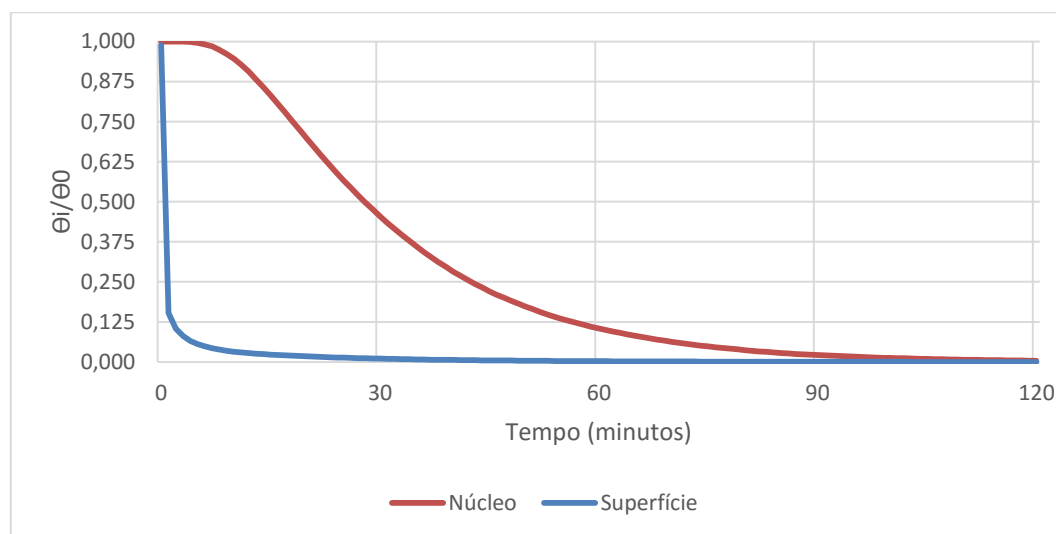


Figura A.55 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 80 mm, Núcleo e Superfície

Tabela A.43 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
80	28	0,05	99,8	27,95
81	29	0,05	99,8	28,95
82	29	0,05	99,8	28,95
83	30	0,05	99,8	29,95
84	31	0,05	99,8	30,95
85	32	0,05	99,8	31,95
86	33	0,05	99,8	32,95
87	33	0,05	99,8	32,95
88	34	0,05	99,8	33,95
89	35	0,05	99,8	34,95
90	36	0,05	99,8	35,95

Tabela A.44 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAA

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
80	56	1,38	97,5	54,6
81	58	1,40	97,5	56,6
82	59	1,40	97,6	57,6
83	61	1,40	97,7	59,6
84	62	1,40	97,7	60,6
85	64	1,42	97,7	62,5
86	65	1,42	97,8	63,5
87	67	1,42	97,8	65,5
88	69	1,42	97,9	67,5
89	70	1,42	97,9	68,5
90	72	1,43	98,0	70,5

### A.2.14. Calibre AAAA - Núcleo

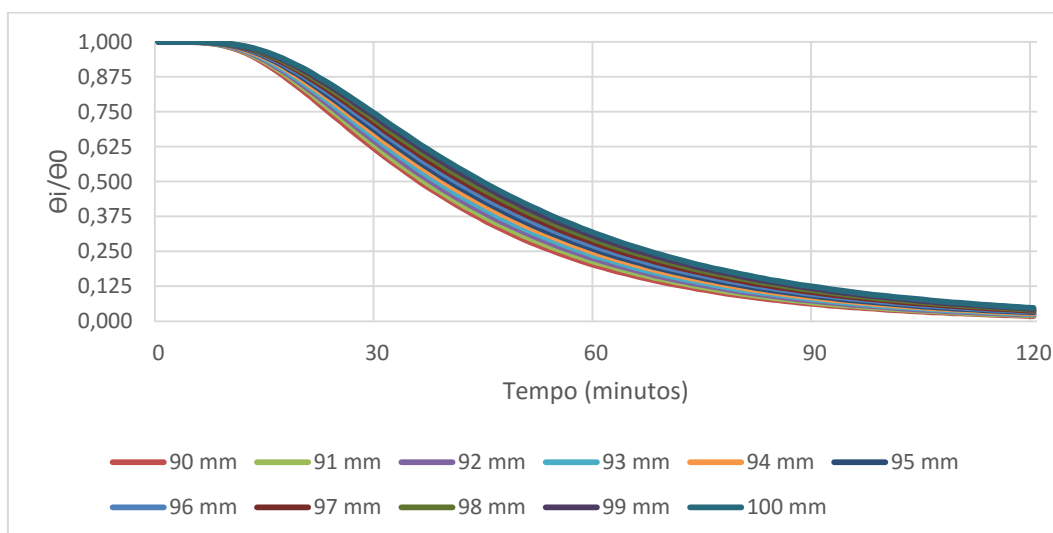


Figura A.56 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAAA, Núcleo

Tabela A.45 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a partir do COMSOL, Núcleo, Calibre AAAA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
90	36	72	100,0	36
91	36	74	105,5	38
92	37	75	102,7	38
93	38	77	102,6	39
94	39	79	102,5	40
95	40	81	102,5	41
96	41	82	100,0	41
97	42	84	100,0	42
98	43	86	100,0	43
99	43	87	102,3	44
100	44	88	100,0	44

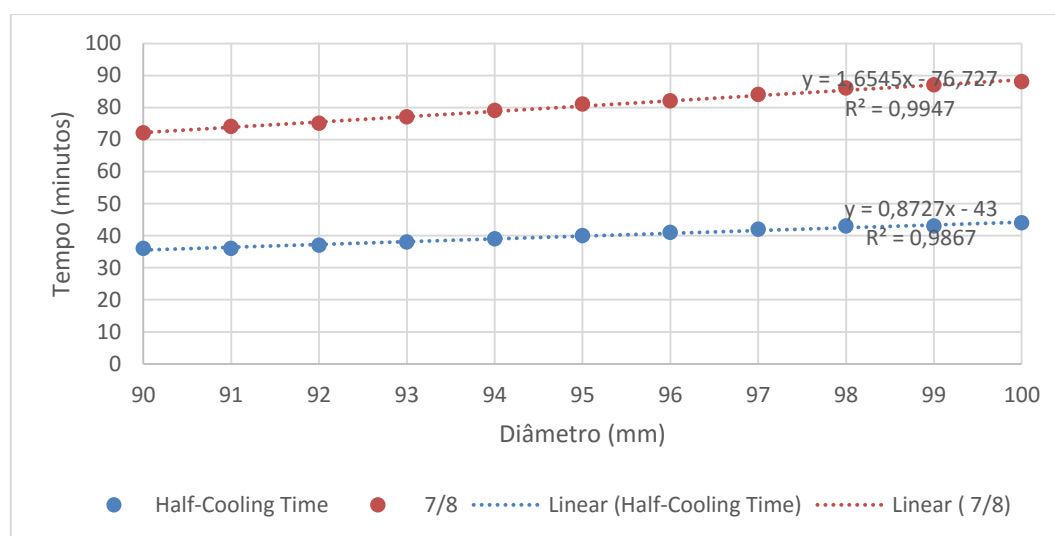


Figura A.57 - Variação do Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAAA, Núcleo

### A.2.15. Calibre AAAA - Superfície

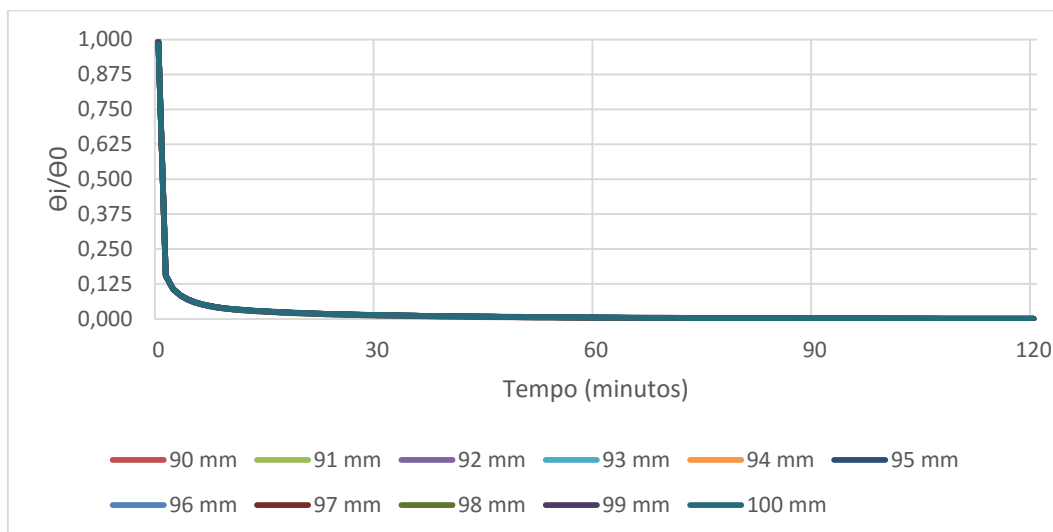


Figura A.58 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo, Calibre AAAA, Superfície

Tabela A.46 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento obtidos a

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (min)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (%)	$\Delta$ Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento (min)
90	3	86	2766,67	83
91	3	86	2766,67	83
92	3	86	2766,67	83
93	3	86	2766,67	83
94	3	86	2766,67	83
95	3	86	2766,67	83
96	3	87	2800,00	84
97	3	87	2800,00	84
98	3	87	2800	84
99	3	87	2800	84
100	3	87	2800	84

partir do COMSOL, Superfície, Calibre AAAA

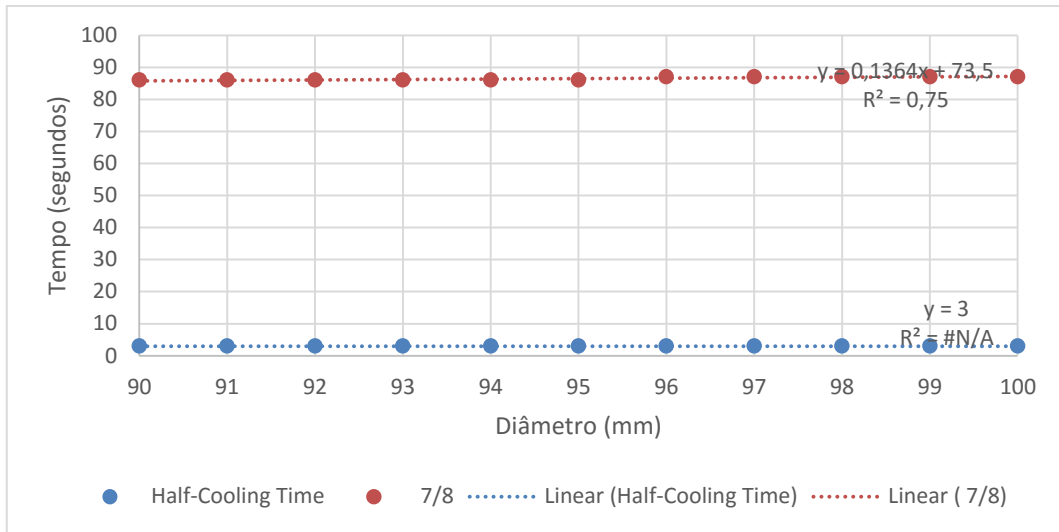


Figura A.59 - Tempo de Meio Arrefecimento e Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento em função do diâmetro, Calibre AAAA, Superfície

### A.2.16. Calibre AAAA - Comparação entre núcleo e superfície

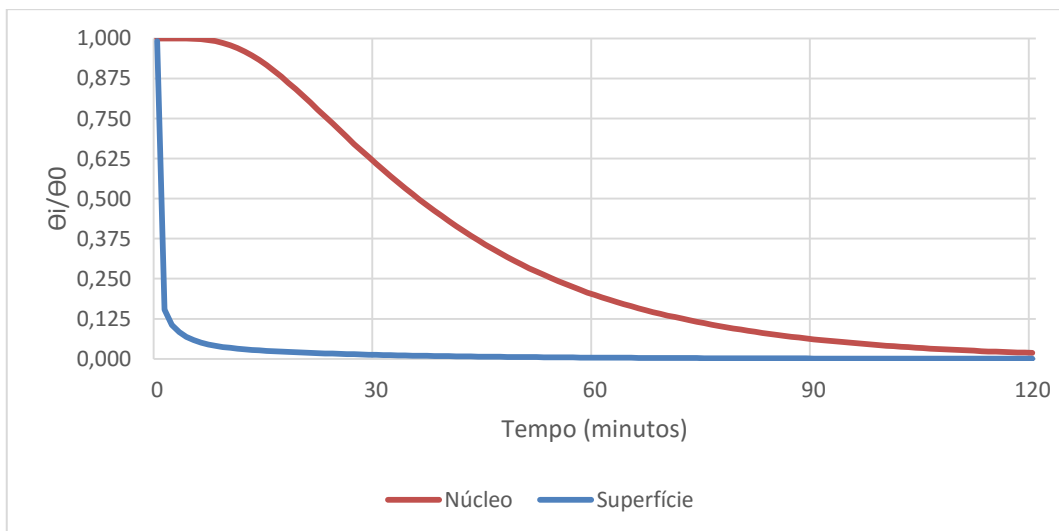


Figura A.60 - Variação da temperatura adimensional ao longo do tempo para o diâmetro de 90 mm, Núcleo e Superfície

Tabela A.47 - Tempo de Meio Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAAA

Diâmetro (mm)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Meio Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
90	36	0,05	99,8	35,95
91	36	0,05	99,8	35,95
92	37	0,05	99,8	36,95
93	38	0,05	99,8	37,95
94	39	0,05	99,8	38,95
95	40	0,05	99,8	39,95
96	41	0,05	99,8	40,95
97	42	0,05	99,8	41,95
98	43	0,05	99,8	42,95
99	43	0,05	99,8	42,95
100	44	0,05	99,8	43,95

Tabela A.48 - Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento do núcleo e superfície relativos ao Calibre AAAA

Diâmetro (mm)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Núcleo) (min)	Tempo de Sete Oitavos de Arrefecimento COMSOL (Superfície) (min)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (%)	$\Delta$ Núcleo e Superfície (min)
90	72	1,43	98,0	70,5
91	74	1,43	98,0	72,5
92	75	1,43	98,0	73,5
93	77	1,43	98,1	75,5
94	79	1,43	98,1	77,5
95	81	1,43	98,2	79,5
96	82	1,45	98,2	80,5
97	84	1,45	98,2	82,5
98	86	1,45	98,3	84,5
99	87	1,45	98,3	85,5
100	88	1,45	98,3	86,5

## Anexo B - Expressões obtidas para o cálculo das propriedades termofísicas do pêssego

É necessário conhecer as propriedades térmicas dos produtos alimentares de forma a ser possível realizar cálculos de transmissão de calor. Estes são necessários para o dimensionamento e desenvolvimento de equipamento de armazenamento e refrigeração, e também para estimar os tempos necessários para refrigerar, congelar, aquecer ou secar os produtos alimentares. As propriedades termofísicas necessárias para os cálculos de transmissão de calor incluem a densidade, calor específico, entalpia, condutibilidade térmica e difusidade térmica dos produtos. Da tabela de dados relativos à composição de várias frutas (ASHRAE, 1998), explicitam-se as propriedades do pêssego:

Tabela B.1 - Conteúdo de humidade, proteínas, gordura e carboidratos presentes no pêssego (ASHRAE, 1998)

Conteúdo de Humidade, %	Proteína, %	Gordura, %	Carboidratos		
			Total, %, Xc	Fibra, %, Xfb	Cinza, %, Xa
Xwo	Xp	Xf			
87,66	0,70	0,90	11,10	2	0,46

Tabela B.2 - Condutividade térmica das várias componentes alimentares, válidas para  $-40^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$

Propriedade	Componente Alimentar	Equação de Propriedade Térmica
Condutividade Térmica, $\frac{W}{m \cdot K}$	Proteína	$K = 1.788 * 10^{-1} + 1.195 * 10^{-3} * t - 2.7128 * 10^{-6} * t^2$
	Gordura	$K = 1.8071 * 10^{-1} + 2.706 * 10^{-4} * t - 1.7749 * 10^{-7} * t^2$
	Carboidratos	$K = 2.0141 * 10^{-1} + 1.3874 * 10^{-3} * t - 4.3312 * 10^{-6} * t^2$
	Fibra	$K = 1.8331 * 10^{-1} + 1.2497 * 10^{-3} * t - 3.1683 * 10^{-6} * t^2$
	Cinza	$K = 3.2962 * 10^{-1} + 1.4011 * 10^{-3} * t - 2.9069 * 10^{-6} * t^2$
	Água	$K = 5.7109 * 10^{-1} + 1.7625 * 10^{-3} * t - 6.7036 * 10^{-6} * t^2$
	Total	$K_{Total} = (0.7 * K_{Proteína} + 0.9 * K_{Gordura} + 11.1 * K_{Carboidratos} + 2 * K_{Fibra} + 0.46 * K_{Cinza} + 87.66 * K_{Água})/100$

Tabela B.3 - Difusividade térmica das várias componentes alimentares, válidas para  $-40^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ 

Propriedade	Componente Alimentar	Equação de Propriedade Térmica
Difusividade térmica, $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Proteína	$\alpha = 6.8714 * 10^{-8} + 4.7578 * 10^{-10} * t - 1.4646 * 10^{-12} * t^2$
	Gordura	$\alpha = 9.8777 * 10^{-8} - 1.2569 * 10^{-11} * t - 3.8286 * 10^{-14} * t^2$
	Carboidratos	$\alpha = 8.0842 * 10^{-8} + 5.3052 * 10^{-10} * t - 2.3218 * 10^{-12} * t^2$
	Fibra	$\alpha = 7.3976 * 10^{-8} + 5.1902 * 10^{-10} * t - 2.2202 * 10^{-12} * t^2$
	Cinza	$\alpha = 1.2461 * 10^{-7} + 3.7321 * 10^{-10} * t - 1.2244 * 10^{-12} * t^2$
	Água	$\alpha = 1.3168 * 10^{-7} + 6.2477 * 10^{-10} * t - 2.4022 * 10^{-12} * t^2$
	Total	$\alpha_{Total} = (0.7 * \alpha_{Proteína} + 0.9 * \alpha_{Gordura} + 11.1 * \alpha_{Carboidratos} + 2 * \alpha_{Fibra} + 0.46 * \alpha_{Cinza} + 87.66 * \alpha_{Água})/100$

Tabela B.4 - Densidade das várias componentes alimentares, válidas para  $-40^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ 

Propriedade	Componente Alimentar	Equação de Propriedade Térmica
Densidade, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Proteína	$\rho = 1.3299 * 10^3 - 5.184 * 10^{-1} * t$
	Gordura	$\rho = 9.2559 * 10^2 - 4.1757 * 10^{-1} * t$
	Carboidratos	$\rho = 1.5991 * 10^3 - 3.1046 * 10^{-1} * t$
	Fibra	$\rho = 1.3115 * 10^3 - 3.6589 * 10^{-1} * t$
	Cinza	$\rho = 2.4238 * 10^3 - 2.8063 * 10^{-1} * t$
	Água	$\rho = 9.9718 * 10^2 + 3.1439 * 10^{-3} * t - 3.7574 * 10^{-3} * t^2$
	Total	$\rho_{Total} = (0.7 * \rho_{Proteína} + 0.9 * \rho_{Gordura} + 11.1 * \rho_{Carboidratos} + 2 * \rho_{Fibra} + 0.46 * \rho_{Cinza} + 87.66 * \rho_{Água})/100$

Tabela B.5 - Calor específico das várias componentes alimentares, válidas para  $-40^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ 

Propriedade	Componente Alimentar	Equação de Propriedade Térmica
Calor Específico, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	Proteína	$c_p = 2.0082 + 1.2089 \cdot 10^{-3} \cdot t - 1.3129 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$
	Gordura	$c_p = 1.9842 + 1.4733 \cdot 10^{-3} \cdot t - 4.8008 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$
	Carboidratos	$c_p = 1.5488 + 1.9625 \cdot 10^{-3} \cdot t - 5.9399 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$
	Fibra	$c_p = 1.8459 + 1.8306 \cdot 10^{-3} \cdot t - 4.6509 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$
	Cinza	$c_p = 1.0926 + 1.8896 \cdot 10^{-3} \cdot t - 3.6817 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$
	Água	$c_p = 9.9718 \cdot 10^2 + 3.1439 \cdot 10^{-3} \cdot t - 3.7574 \cdot 10^{-3} \cdot t^2$
	Total	$c_p \text{ Total} = (0.7 \cdot c_p \text{ Proteína} + 0.9 \cdot c_p \text{ Gordura} + 11.1 \cdot c_p \text{ Carboidratos} + 2 \cdot c_p \text{ Fibra} + 0.46 \cdot c_p \text{ Cinza} + 87.66 \cdot c_p \text{ Água})/100$