

Caracterização e estudo de materiais e soluções construtivas para uma máquina de café dupla de unidoses

Paula Catarina Moreira Pinto

Dissertação de Mestrado

Supervisor: Professor Fernando Jorge Lino Alves

Orientador: Professor Augusto Barata Da Rocha



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Porto, fevereiro 2018

Aos meus pais e ao meu irmão.

Resumo

O consumo de café tem vindo a aumentar a nível mundial, em parte, devido à maior variedade de métodos de preparação existentes. Destes, a categoria das unidoses destaca-se pela comodidade que oferece, num contexto de uma sociedade com um estilo de vida cada vez mais “acelerado”. De facto, esta categoria é líder de mercado a nível global, em todo o setor das bebidas quentes e, entre 2016 e 2017, foi o grande motor para o crescimento do consumo de café em Portugal.

Assim, numa sociedade que possui padrões de consumo cada vez mais exigentes e baseados nas tecnologias eletrónicas, existe toda uma indústria que está em crescimento, existindo um grande conjunto de oportunidades que podem ser aproveitadas.

A dissertação é realizada no âmbito de um projeto de maiores dimensões, o qual visa o desenvolvimento de uma nova máquina de café em unidoses (cápsulas), mais ecológica e eficiente. Esta deve possuir uma forte componente tecnológica e ser completamente autónoma. Trata-se de um projeto ambicioso e inovador.

Os trabalhos desenvolvidos na presente dissertação, dizem respeito às primeiras atividades realizadas neste projeto. Estes procuram a compreensão detalhada do funcionamento de uma máquina de café, com o objetivo de identificar e analisar os componentes que são determinantes para a obtenção rápida de um café de qualidade. Pretende-se propor algumas soluções para tentar melhorar o desempenho destes componentes e criar um guia técnico completo da máquina de café.

Começa-se, então, por efetuar um levantamento detalhado dos componentes e dos circuitos funcionais da máquina de café em unidoses, considerada para estudo, concluindo-se que o grupo de extração é o responsável direto pela preparação do café, aquecendo a água e comprimindo a cápsula. Assim, os estudos posteriores convergem para a análise deste grupo, tendo-se efetuado a caracterização metalográfica de cada um dos seus constituintes, seguida da simulação térmica, com recurso ao *software Abaqus®*, do seu aquecimento e do aquecimento da água.

A caracterização metalográfica, em máquinas concorrentes, de um constituinte do grupo que se considera ser fundamental, permite a comparação de resultados. No final, conclui-se acerca do material e do processo de fabrico de cada constituinte e analisa-se a viabilidade do mecanismo de funcionamento do grupo de extração.

Avalia-se, ainda, o rigor da medição da temperatura da água, na solução construtiva em estudo e infere-se acerca do impacto que o método de medição utilizado pode ter na qualidade do café obtido e na rapidez da sua preparação. Por fim, são identificados vários parâmetros essenciais no aquecimento do grupo e da água, que podem ser testados, caso se pretenda o desenvolvimento de um novo grupo otimizado, para incorporar a nova máquina.

A dissertação termina com uma abordagem aos trabalhos realizados no âmbito do primeiro protótipo funcional e com a proposta de um possível circuito a implementar no mesmo.

Em suma, trata-se de um trabalho com uma extensa componente prática, que abrange um conjunto diversificado de áreas da engenharia mecânica. Espera-se, assim, reunir um conjunto de informação que seja útil, quer para os intervenientes do projeto, quer para os leitores interessados nesta temática.

Characterization and study of materials and constructive solutions for a double pod coffee machine

Abstract

Coffee consumption has been increasing worldwide, in part, due to the greater variety of existing brewing methods. Within these methods, the category of pods has been standing out for the commodity it offers, in a context of a society with an increasingly "fast-paced" lifestyle. In fact, this category is the world market leader in the sector of hot drinks and, between 2016 and 2017, was the main responsible for the growth of coffee consumption in Portugal.

Thus, in an increasingly demanding society, with consumption patterns based on electronic technologies, there is an entire growing industry with a number of opportunities that can be exploited.

The dissertation evolves as part of a broader project, which aims at the development of a new, ecological and more efficient, pod coffee machine (capsule machine). This coffee maker is intended to be fully automated and to possess strong technological features. Therefore, one can realise that this is a very innovative and ambitious project.

The work undertaken in this dissertation concerns the first activities carried out in this project. It seeks a detailed understanding of the operation of a coffee maker, with the purpose of identifying and analysing the components, which are decisive for quick production of a quality coffee. The goals of this dissertation are to propose some solutions to attempt the improvement of the performance of these components while providing a complete technical guide to the coffee machine.

First of all, a detailed survey of the components and functional circuits of the coffee machine, under study, is carried out, leading to the conclusion that the extraction group is the direct intervenient in the coffee production, as it is responsible for heating up the water and compressing the capsule. Thus, the subsequent studies target the analysis of this group, with the metallographic characterisation of each of its constituents, followed by the numerical simulation of the heating of the group, as well as the water in circulation. The software used in the simulation is *Abaqus*®.

The metallographic characterisation of constituents from competing machines allows the later comparison of results and the attainment of enriched conclusions. In the end, a reflection is made regarding the materials and processes. The feasibility of the operating mechanism of the extraction group is also analysed.

In addition to this, for the given group, the accuracy of the water temperature measurement is evaluated. Lastly, some of the most relevant parameters for the heating of the group and water are identified. Future studies should consider to test and manipulate these parameters, in order to develop an optimized group.

The dissertation ends with an approach to the works carried out within the scope of the first functional prototype, where is presented a proposal to a possible circuit to implement.

All in all, this is a work with an extensive practical component, covering a diverse set of areas of mechanical engineering. It is expected, therefore, to gather a set of information that is useful, both for the project stakeholders and for readers who may have an interest in this theme.

Agradecimentos

Gostaria de dar os sinceros agradecimentos a todos os que, de algum modo, colaboraram na realização deste projeto, reconhecendo, por isso, o seu papel fundamental para o sucesso do mesmo.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao professor Jorge Lino, pela possibilidade de realizar a dissertação de mestrado no âmbito do projeto *BICAFÉ*®, que se veio a revelar um grande desafio e uma boa oportunidade para trabalhar em equipas multidisciplinares de profissionais. Agradeço, também, todo o apoio, orientação e dedicação demonstrados no decorrer das atividades, fundamentais para o contínuo aperfeiçoamento das mesmas.

Ao professor Barata da Rocha, agradeço o entusiasmo pelo projeto que desenvolvi e a forma como sempre me lançou desafios interessantes e com os quais aprendi bastante. Reconheço, também, o facto de fazer questão que eu estivesse sempre presente em todas as atividades realizadas pelas diversas equipas.

À *BICAFÉ*® estou grata por todo o interesse demonstrado nos meus trabalhos e pelo fornecimento de vários componentes necessários para a realização das tarefas. Aos seus técnicos, em particular, ao técnico João Gonçalves, agradeço a disponibilidade para esclarecer dúvidas e a partilha de conhecimentos.

Ao professor Rui Neto pela sua experiência e partilha de conhecimento na área de fundição, fundamental para uma correta caracterização metalográfica dos componentes. Às técnicas Emília Soares e Armanda Teixeira, pela ajuda prática fornecida, sempre que foi necessário preparar amostras para análise ou identificar a composição química das ligas.

Ao engenheiro Luís Galamba Carvalho pelo entusiasmo, pela paciência e por tudo o que me ensinou, tornando possível a concretização da simulação térmica, no tempo previsto. Agradeço, ainda, a forma como sempre me desafiou a melhorar os resultados obtidos, o que levou a que aprendesse bastante na área de simulação numérica. Ao professor Abel dos Santos, estou grata pela disponibilidade e pelos conselhos, essenciais para familiarização com o *software Abaqus*®.

Ao Designer Industrial, Vasco Canavarro, por estar sempre pronto para ajudar, em particular, na renderização das imagens das modelações.

Aos meus pais e ao meu irmão, por toda compreensão demonstrada e pelo apoio incondicional em todos os momentos da realização da dissertação.

Ao projeto NORTE-01-0145-FEDER-000022 - SciTech - Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).



Lista de siglas e acrónimos

<i>3D</i>	Tridimensional
<i>AICC</i>	Associação Industrial e Comercial do Café
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i>
<i>CAE</i>	<i>Computer Aided Engineering</i>
<i>CBL</i>	Cabeça Cilíndrica Boleada Larga com oco cruciforme
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>CFL</i>	Courant-Friedrichs-Lewy
<i>CHC</i>	Cabeça Cilíndrica de oco Hexagonal
<i>FEA</i>	<i>Finite Element Analysis</i>
<i>FEUP</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
<i>HORECA</i>	<i>Hotel/Restaurant/Café</i>
<i>ICO</i>	<i>International Coffee Organization</i>
<i>INEGI</i>	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
<i>IoT</i>	<i>Internet of Things</i>
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>LCA</i>	<i>Life Cycle Assessment</i>
<i>MIEM</i>	Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
<i>SI</i>	Sistema Internacional
<i>TI</i>	Tecnologia da Informação
<i>UNS</i>	<i>Unified Numbering System</i>

Índice

1	Introdução	1
1.1	A <i>BICAFÉ</i> ® e o projeto das máquinas e das cápsulas de café do futuro.....	1
1.2	Contextualização da dissertação e motivação.....	2
1.3	Objetivos da dissertação	2
1.4	Metodologia adotada	2
1.5	Estrutura da dissertação	3
2	Estado da arte	5
2.1	Produção e consumo de café	5
2.2	A cadeia de logística do café	8
2.2.1	Impacto socioeconómico	9
2.2.2	Impacto ambiental	10
2.3	A origem e a evolução das máquinas	11
2.3.1	Breves referências históricas.....	12
2.3.2	Estudo do mercado atual.....	13
2.4	Os principais componentes das máquinas	17
2.4.1	Unidades de aquecimento.....	19
2.4.2	Bombas	23
2.4.3	Válvulas e elementos de sensorização.....	26
2.4.4	Unidade de controlo	26
2.5	Sustentabilidade ambiental das máquinas em unidoses	27
2.5.1	Consumos energéticos.....	28
2.5.2	As cápsulas de café.....	29
2.6	Tendências e oportunidades futuras	30
3	Arquitetura geral da máquina dupla de unidoses da <i>BICAFÉ</i> ®	33
3.1	Identificação de componentes	33
3.1.1	Módulo de vapor de água e água quente.....	34
3.1.2	Módulos de extração de café.....	38
3.1.3	Outros componentes	41
3.2	Circuitos e funcionamento geral.....	45
3.2.1	Apresentação dos circuitos.....	45
3.2.2	Análise do funcionamento geral.....	48
4	Análise do grupo de extração	51
4.1	Apresentação da constituição e montagem.....	51
4.2	Análise do funcionamento.....	55
4.3	Análise metalográfica dos constituintes.....	57
4.3.1	Termoblocos.....	57

4.3.2 Base metálica de suporte do grupo	72
4.3.3 Êmbolo da cápsula e aro de suporte da mola	74
4.3.4 Placa permutadora de calor e peças roscadas	78
4.3.5 Mola do êmbolo.....	85
4.3.6 Resumo dos resultados.....	87
4.4 Análise térmica do termobloco	88
4.4.1 Formulação do problema.....	88
4.4.2 Preparação do modelo CAD	90
4.4.3 Análise e discussão de resultados	91
4.4.4 Notas finais	104
5 Desenvolvimento do protótipo funcional com os componentes originais.....	107
5.1 <i>Design</i> industrial do produto	107
5.1.1 Desenvolvimento de conceitos e do <i>design</i> geral.....	107
5.1.2 Aspectos gerais do projeto mecânico	109
5.2 Projeto de sistemas.....	110
5.2.1 Adaptação de componentes e circuitos.....	110
5.2.2 Projeto e montagem de uma bancada de testes	112
5.3 Modelação provisória do protótipo	113
5.4 Desenvolvimento de cápsulas biodegradáveis.....	113
6 Conclusões e trabalhos futuros	115
6.1 Conclusões.....	115
6.2 Trabalhos futuros	116
7 Referências bibliográficas	119
ANEXO A. Planeamento das atividades experimentais	125
ANEXO B. Placa eletrónica da máquina	126
ANEXO C. Classificação dos parafusos do grupo	127
C1. Parafusos que fixam o grupo à placa e a placa à máquina.....	127
C2. Parafusos que fixam o termobloco à base	127
ANEXO D. Tabelas dos reagentes	128
D1. Reagentes de ligas de alumínio	128
D2. Reagente das ligas de cobre.....	128
D3. Reagente do aço de mola.....	129
ANEXO E. Metodologia de implementação do problema térmico no <i>Abaqus</i> ®	131
E1. Criação dos modelos FEA.....	131
E2. Geração de malhas e criação de uma interface comum (superfície de malha)	133
E3. Criação e atribuição de materiais	136
E4. <i>Assembly</i>	138
E5. <i>Module step</i>	138

E6. Condições fronteira e condições iniciais	139
----------------------------------------------------	-----

Índice de figuras

Figura 1 Localização do <i>coffee belt</i> , a região do globo na qual se concentram os maiores produtores e exportadores de café a nível mundial - adaptado de [8].....	5
Figura 2 Produção média anual de café (em milhões de embalagens de 60kg) a nível mundial de cada região exportadora de café, entre 2013 e 2016 - adaptado de "Trade Statistics Tables: Total production by exporting countries" [9].....	6
Figura 3 Consumo médio anual de café (em milhões de embalagens de 60kg) a nível mundial, de 2012 a 2016, para países importadores e exportadores de café - adaptado de "Trade Statistics Tables: World Coffee Consumption" [1].....	6
Figura 4 Partição do consumo total de café pelas diferentes regiões do globo no ano de 2016 - adaptado de "Trade Statistics Tables: World Coffee Consumption" [1].	7
Figura 5 Taxas de crescimento médias anuais de consumo de café de cada região do globo, entre 2012 e 2016 -adaptado de "Trade Statistics Tables: World Coffee Consumption" [1].....	7
Figura 6 Principais fases da cadeia de abastecimento do café, com referência aos principais impactos ambientais - adaptado de [13].....	10
Figura 7 Primeira máquina de café expresso; a) representação esquemática do funcionamento da máquina patenteada por Bezzera em 1903 [27]; b) máquina real de Bezzera após aperfeiçoamentos desenvolvidos por Pavoni em 1906 [28].	12
Figura 8 Vários tipos de máquinas de café elétricas existentes no mercado; a) máquina de gotejamento num filtro, <i>Philips HD7457/20</i> [31]; b) máquina manual com manípulo porta-filtros, <i>Philips Saeco Poemia HD8327/47</i> [32]; c) máquina de café unidoses (cápsulas), <i>Vianté SpressoLuxe CAF-SP5</i> [33]; d) máquina de café completamente automática <i>Philips Saeco Intelia HD8753/87</i> [34].	13
Figura 9 Evolução do volume de vendas (em toneladas) e da taxa de crescimento média anual das cápsulas de café, ocorridas e previstas, entre 2011 e 2021 - adaptado de [35].....	14
Figura 10 Máquina de café profissionais <i>Ascaso®</i> - adaptado de [37]; a) máquina <i>BAR ONE</i> , com manípulo e dois grupos; b) máquina <i>BAR KAP</i> , de unidoses com dois grupos.....	16
Figura 11 Máquinas inteligentes; a) Máquina de café <i>Smarter</i> [40]; b) máquina <i>memory</i> [41].	17
Figura 12 Apresentação dos principais grupos de constituintes de uma máquina de café atual..	18
Figura 13 Circuito termo-hidráulico de uma máquina de café expresso típica – adaptado de [25].	19
Figura 14 Representação esquemática do funcionamento de um sistema de aquecimento constituído por uma única caldeira – adaptado de [44].	20
Figura 15 Representação esquemática do funcionamento de um sistema de aquecimento constituído por duas caldeiras – adaptado de [44].	21
Figura 16 Representação esquemática do funcionamento de um sistema de aquecimento constituído por uma caldeira e um permutador de calor – adaptado de [44].....	21
Figura 17 Vários tipos de termoblocos [45] e [47]; a) termobloco de liga de alumínio com resistência elétrica exterior; b) duas metades de um termobloco que se aparafusam, sendo visíveis os canais de água e alguns vestígios de corrosão. Neste caso a resistência encontra-se do lado exterior de uma das metades; c) termobloco em forma de disco com resistência embutida, sendo	

visível que os canais de água estão parcialmente bloqueados com impurezas; d) termobloco com resistência embutida no interior, com um formato exterior diferente do apresentado em c).....	22
Figura 18 Representação esquemática do funcionamento de um sistema de aquecimento constituído por um termobloco – adaptado de [44].....	23
Figura 19 Bomba rotativa de palhetas com o motor acoplado e bomba vibratória, lado a lado – adaptado de [48].....	24
Figura 20 Vista em corte do interior da bomba de palhetas rotativa, com os seus respetivos componentes – adaptado de [49].	25
Figura 21 Vista em corte da bomba de vibração, com os seus constituintes, na posição de repouso – adaptado de [51].	25
Figura 22 Placa eletrónica da <i>Ascaso</i> ® [53].	27
Figura 23 Representação simplista da relação geral entre os diversos componentes principais de uma máquina de café – adaptado de [54].	27
Figura 24 Decomposição da pegada de carbono total da produção de um café <i>Nespresso</i> , pelas diversas fases da cadeia - adaptado de [55].	28
Figura 25 Máquina profissional <i>Ascaso</i> ®, <i>Bar Kap</i> de unidoses com dois grupos – adaptado de [37]; (A) as duas saídas de café pertencentes aos módulos de extração de café; (B) saídas de vapor de água e água quente do módulo de obtenção de vapor e água.....	33
Figura 26 Vista de cima da máquina, com todos os seus componentes montados e com identificação dos componentes do módulo de vapor de água e água quente: (3) caldeira, (4) torneiras, (10) recolhedor de água, (11) pressostato, (17) válvula de segurança, (18) sonda de nível, (19) válvula de respiro e (20) termostato de segurança.....	34
Figura 27 Identificação dos componentes do módulo de vapor de água e água quente, na vista frontal da máquina: (13) manómetro, (14) saída de vapor de água e (15) saída de água quente.	34
Figura 28 Apresentação da forma de montagem da caldeira (3) e da respetiva bomba (5) na máquina, com ampliação da bomba (5); a) caldeira (3) e bomba (5) montados na máquina com a identificação de outros componentes adjacentes, como as bombas dos grupos (6) e o recolhedor de água (10); b) ampliação da bomba da caldeira (5).	35
Figura 29 Vista de baixo da caldeira (3); a) vista de baixo inicial com todos os componentes montados; b) desmontagem da resistência.....	35
Figura 30 Resistência da caldeira (3) com a presença das três porcas M8 e das três anilhas, que garantem o seu posicionamento à caldeira (3). A resistência funciona a 230V e tem uma potência de funcionamento de 1200W.....	36
Figura 31 Caldeira (3) com destaque para a sonda de nível (18); a) vista de cima da caldeira (3) com indicação do local da sonda de nível (18); b) sonda de nível (18), com 120mm de comprimento.....	36
Figura 32 Modelação efetuada em <i>Solidworks</i> ® [60] do conjunto da caldeira (3) com todos os seus elementos montados. Destaque para a indicação das entradas e saídas de água de todas as suas ligações.	37
Figura 33 Indicação da localização dos módulos de extração na máquina e identificação da maioria dos seus componentes; a) vista de topo da máquina com indicação do local dos dois módulos de extração na máquina de café; b) ampliação de um dos módulos de extração para identificação de componentes: (6) bomba do grupo, (7) contador volumétrico, (8) electroválvula de três vias e	

duas posições, (9) termobloco, (20) termostato de segurança, (21) válvula reguladora de pressão e (22) sonda de temperatura. O grupo de extração (32) é constituído por vários componentes. 38	
Figura 34 Bombas dos grupos (6).....	39
Figura 35 Contador volumétrico (7) desmontado; a) contador volumétrico (7) montado; b) interior do contador volumétrico, após remoção da tampa superior aparafusada; c) interior da tampa superior.....	39
Figura 36 Vistas frontais da máquina com indicação das gavetas; a) (31) gaveta que recolhe as cápsulas usadas aberta; b) identificação das gavetas de colocação das cápsulas nos grupos (16) e da gaveta que recolhe as cápsulas usadas (31). Ambas estão fechadas.....	40
Figura 37 Gaveta do grupo (16), onde se introduzem as cápsulas; a) registo fotográfico da gaveta; b) modelação da gaveta em <i>Solidworks</i> ® [60].	40
Figura 38 Interior da máquina nas proximidades das gavetas do grupo (16) e da gaveta que recolhe as cápsulas usadas (31); a) extremidade dos pinos de guiamento das gavetas (16) onde se introduzem as cápsulas, sendo visível o <i>micro switch</i> (28) de fecho da gaveta do grupo (16) e alguns componentes próximos, como a bomba do grupo (6) e a traseira do manómetro (13); b) <i>micro switch</i> (29) de fecho da gaveta que recolhe as cápsulas usadas (31) e a bomba do grupo (6), que se encontra próxima.	41
Figura 39 Identificação e indicação da localização dos componentes responsáveis pela entrada e fornecimento de água, na máquina. Também são identificados alguns componentes adjacentes; a) vista de cima da máquina com a localização dos componentes; b) identificação do depósito de água (1), da electroválvula de entrada de água (2), do termostato de segurança da resistência da placa (23), do <i>micro switch</i> do depósito (30) e das pés reguláveis (34).....	41
Figura 40 Destaque para os componentes responsáveis pela entrada e fornecimento de água à máquina; a) electroválvula de entrada de água (2); b) depósito de água (1) com o <i>micro switch</i> (30).	42
Figura 41 Modelação efetuada em <i>Solidworks</i> ® [60] do depósito (1) e do seu <i>micro switch</i> (30), com indicação das entradas e saídas de água em todas as suas ligações.	42
Figura 42 Vista frontal da máquina, parcialmente desmontada, com identificação do copo de esgoto (12), do botão rotativo de três posições (24), do botão ON/OFF (25), dos botões do grupo (26) e dos botões de seleção do tamanho do café (27).....	43
Figura 43 Máquina parcialmente desmontada; a) indicação da localização da placa (38) onde se colocam as chávenas; b) indicação da localização da resistência (37) que aquece a placa (38), onde se aquecem as chávenas.....	44
Figura 44 Identificação da placa eletrónica (36) e do bloco eletrónico adicional (40); a) vista de cima da máquina com a localização da placa (36) e do bloco (40); b) placa eletrónica (36) ampliada e identificação do bloco eletrónico adicional (40) para controlar a iluminação do topo da máquina.	44
Figura 45 Circuito hidráulico inicial da máquina de café, com o registo fotográfico dos componentes.	45
Figura 46 Circuito hidráulico final da máquina, com a simbologia mais indicada.	46
Figura 47 Vista de topo da máquina com a disposição dos grupos na mesma.....	51
Figura 48 Grupo de extração da máquina, capturado em vários planos; a) vista de topo do grupo de extração; b) vista frontal do grupo de extração; c) vista lateral do grupo de extração; d) vista da base inferior do grupo de extração, onde se dá a compressão da cápsula.....	52

Figura 49 Grupo de extração: (a) termobloco, 1000W e 230V; (b) base metálica de suporte; (c) termostato de segurança do termobloco; (de) entrada do canal de água do termobloco; (ds) saída do canal de água do termobloco; (e) resistência interna do termobloco.	52
Figura 50 Base metálica de suporte do grupo com destaque dos furos onde se alojam os parafusos que permitem a fixação do grupo à placa de suporte em plástico.....	53
Figura 51 Placa de suporte em plástico com destaque, a laranja, os furos que alojam os parafusos que fixam o grupo à peça e os furos, a azul, que alojam os parafusos que fixam a placa ao corpo da máquina.....	53
Figura 52 Grupo de extração com destaque para os quatro parafusos que garantem a fixação entre o termobloco e a base metálica.	54
Figura 53 Separação do termobloco da base metálica de suporte e apresentação dos restantes elementos do grupo, pela sua ordem de montagem na cavidade da base.....	54
Figura 54 Vista explodida do grupo de extração, com todos os seus componentes modelados em <i>SolidWorks</i> ® [60].....	55
Figura 55 Vista em corte da modelação do grupo de extração com identificação dos seus componentes e com indicação da passagem da água no seu interior [60].....	56
Figura 56 Máquinas dos termoblocos em estudo; a) máquina dupla de unidoses da <i>BICAFÉ</i> ®; b) máquina de unidoses doméstica da <i>BICAFÉ</i> ®; c) máquina de unidoses doméstica da <i>KRUPS</i> ®, na versão <i>DOLCE GUSTO</i>	58
Figura 57 Localização de cada termobloco na respetiva máquina; a) Máquina dupla de unidoses da <i>BICAFÉ</i> ® e respetivo termobloco (A); b) máquina de unidoses doméstica da <i>BICAFÉ</i> ® e respetivo termobloco (B); c) máquina de unidoses doméstica da <i>KRUPS</i> ®, na versão <i>DOLCE GUSTO</i> , e respetivo termobloco (C).....	58
Figura 58 Termobloco A; a) destaque para o plano de apartação; b) destaque para as marcas dos extratores e para as cavidades resultantes do suporte utilizado para fixar a posição dos canais da água e da resistência no interior do molde.	59
Figura 59 Termobloco B; a) vista exterior da metade do termobloco B com resistência. Destaque para as marcas dos extratores e para as cavidades resultantes do suporte utilizado para fixar a posição da resistência no interior do molde; b) vista exterior da metade do termobloco B sem resistência, onde se observam o vedante na zona central e os parafusos que unem as duas metades; c) vista interior de uma das metades do termobloco, observando-se os canais por onde circula a água e alguns vedantes. Destaque para a existência de calcário e impurezas que bloqueiam os canais.	59
Figura 60 Termobloco C; a) destaque para as marcas dos extratores e para a existência de ranhuras e ressaltos cuja função é posicionar o termobloco nos encaixes existentes na máquina; b) destaque para as cavidades resultantes do suporte utilizado para fixar a posição dos canais da água e da resistência no interior do molde.	60
Figura 61 Identificação dos planos de corte em cada termobloco; a) termobloco A seccionado; b) termobloco B seccionado; c) termobloco C seccionado.	61
Figura 62 Macroestrutura do termobloco A, com identificação dos tubos da água e dos componentes da resistência. Destaque para a existência de vários poros.....	61
Figura 63 Macroestrutura do termobloco B.	62
Figura 64 Macroestrutura do termobloco C, com identificação dos tubos da água e dos constituintes da resistência. Destaque para a existência de vários poros.....	63

Figura 65 Diagrama de fases binário das ligas de alumínio-silício, com identificação das ligas obtidas para cada um dos termoblocos A, B e C, considerando, apenas, o efeito do silício [66]. ..65	65
Figura 66 Microestruturas obtidas com o microscópio ótico, para os termoblocos A e C. Reagente: <i>Keller's</i> . Objetiva 5X; a) microestrutura da amostra A (termobloco A), verificando-se a existência de vários poros (cavidades de cor preta) cujas dimensões variam entre 400 e 500µm (0.4 a 0.5mm); b) microestrutura da amostra C2 (termobloco C), verificando-se a existência de vários poros (cavidades de cor preta) cujas dimensões vão até aos 900µm (0.9mm)..... 66	66
Figura 67 Microestrutura da amostra B (termobloco B), onde se verifica a existência de vários poros (cavidades de cor preta), sendo que os de maior dimensão rondam os 200µm (0.2mm). Reagente: <i>Keller's</i> . Objetiva 5X. 67	67
Figura 68 Microestruturas da liga presente na amostra A (termobloco A); a) destaque para o poro (A). Reagente: <i>Keller's</i> . Objetiva 20X; b) microestrutura típica de uma liga de fundição, constituída por dendrites de solução sólida de alumínio (A), com eutético de silício acicular (B) e, possivelmente, alguns cristais primários de silício (C). Reagente: <i>Keller's</i> . Objetiva 50X..... 67	67
Figura 69 Microestruturas da liga presente na amostra B (termobloco B); a) destaque para o poro (A). Reagente: <i>Keller's</i> . Objetiva 20X; b) microestrutura típica de uma liga de fundição, constituída pela matriz de solução sólida de alumínio (A) com cristais aciculares de eutético de silício (B). Reagente: <i>Keller's</i> . Objetiva 50X..... 68	68
Figura 70 Microestruturas da liga presente na amostra C1 (termobloco C); a) microestrutura típica de uma liga de fundição com eutético de silício fibroso/globular (B) numa matriz dendrítica de alumínio (A), numa zona junto ao tubo da resistência (C). É possível que exista alguma porosidade (pontos negros). Reagente: <i>Keller's</i> . Objetiva 20X; b) microestrutura típica de uma liga de fundição, constituída pela matriz dendrítica de alumínio (A) e pelo eutético de silício fibroso/globular (B). O ponto (C) é, provavelmente, um poro. Reagente: <i>Keller's</i> . Objetiva 50X..... 69	69
Figura 71 Microestruturas da liga presente na amostra C2 (termobloco C); a) microestrutura típica de uma liga de fundição com eutético de silício fibroso/globular (B) numa matriz dendrítica de alumínio (A). É possível que existam alguns cristais de silício primários (C). Reagente: <i>Keller's</i> . Objetiva 20X; b) microestrutura típica de uma liga de fundição, constituída pela matriz dendrítica de alumínio (A) e pelo eutético de silício fibroso/globular (B). As agulhas (C) são, muito provavelmente, FeSiAl. Reagente: <i>Keller's</i> . Objetiva 50X. 69	69
Figura 72 Microestrutura da amostra C2 (termobloco C) junto ao tubo da água (C), com eutético de silício fibroso (B) numa matriz dendrítica de alumínio (A), sendo visíveis dois cristais de silício primário (D). Reagente: <i>Keller's</i> . Objetiva 50X. 70	70
Figura 73 Apresentação da base metálica de suporte do grupo; a) vista do interior da base, com referência para a existência de marcas de extratores; b) vista do exterior da base, com indicação da região polida. 72	72
Figura 74 Base metálica de suporte seccionada; a) identificação dos planos de corte definidos na base; b) macroestrutura da base..... 72	72
Figura 75 Amostra da base metálica de suporte do grupo..... 73	73
Figura 76 Microestruturas da liga presente na amostra da base metálica de suporte do grupo; a) microestrutura típica de uma liga para fundição com eutético de silício acicular (B) numa matriz dendrítica de alumínio (A) e com cristais primários de silício (C). Reagente: <i>Keller's</i> . Objetiva 20X; b) microestrutura típica de uma liga de fundição, constituída por dendrites de solução sólida de alumínio (A), com eutético de silício acicular (B) e, possivelmente, alguns cristais primários de	

silício (C). Também se observam várias agulhas que podem ser agulhas de FeSiAl (D). Reagente: Keller's. Objetiva 50X.....	74
Figura 77 Apresentação do êmbolo da cápsula; a) êmbolo da cápsula, antes da análise; b) êmbolo seccionado para análise; c) amostra para análise microscópica.	74
Figura 78 Microestruturas da amostra do êmbolo, sendo visível vários cristais de solução sólida de alumínio (A), com grandes dimensões, orientados na direção da extrusão. (B) indica as fronteiras de grão. Reagente: Poulton's; a) objetiva de 5X; b) objetiva de 10X.	75
Figura 79 Microestruturas da amostra do êmbolo, sendo visível vários cristais de solução sólida de alumínio, com grandes dimensões, orientados na direção da extrusão. Reagente: HF (0.2%); a) objetiva de 5X; b) objetiva de 10X.....	76
Figura 80 Aro metálico seccionado e respetiva amostra; a) aro seccionado; b) amostra para analisar ao microscópio.....	77
Figura 81 Microestruturas da amostra do aro, sendo visível vários cristais de solução sólida de alumínio, com grandes dimensões, orientados na direção da extrusão. Reagente: Poulton's; a) objetiva de 5X; b) objetiva de 10X.....	78
Figura 82 Placa permutadora de calor; a) placa permutadora de calor vista da parte superior; b) parte inferior da placa permutadora de calor com destaque para a presença de algum calcário e corrosão (A).....	79
Figura 83 Placa permutadora de calor seccionada; a) identificação do plano de corte efetuado na placa; b) macroestrutura da placa.....	79
Figura 84 Amostra da placa permutadora de calor.	80
Figura 85 Microestruturas obtidas na amostra da placa permutadora de calor. Microestrutura típica de um latão (60-40) constituído pela fase β (cor escura) e fase α (cor clara). Reagente: Tabela 22 do anexo D2; a) objetiva 20X; b) objetiva 50X.....	81
Figura 86 Apresentação da peça roscada grande (à direita) e da peça roscada pequena (à esquerda); a) exterior da peça roscada grande; b) topo da peça roscada grande; c) exterior da peça roscada pequena; d) topo da peça roscada pequena.....	81
Figura 87 Cortes efetuados nas peças roscadas com destaque para a cor amarelada interior; a) peça roscada; b) peça roscada pequena.....	82
Figura 88 Amostras das peças roscadas; a) amostra da peça roscada grande; b) amostra da peça roscada pequena.....	82
Figura 89 Microestruturas da amostra da peça roscada grande. Microestrutura típica de um latão (60-40) constituído pela fase β (cor escura) e fase α (cor clara). Reagente: Tabela 22 do anexo D2; a) objetiva 20X; b) destaque para a observação de vários pontos escuros dispersos pela microestrutura que, provavelmente são chumbo. Objetiva 50X.	83
Figura 90 Microestruturas da amostra da peça roscada pequena. Microestrutura típica de um latão (60-40) constituído pela fase β (cor escura) e fase α (cor clara). Reagente: Tabela 22 do anexo D2; a) objetiva 20X; b) objetiva 50X.....	84
Figura 91 Peça roscada grande; a) amostra da peça com indicação do local em análise na microestrutura b); b) microestrutura com indicação da espessura do revestimento (3.33 μ m). Objetiva: 50X. Reagente: Tabela 22 do anexo D2.....	85
Figura 92 Peça roscada pequena; a) amostra da peça com indicação do local em análise na microestrutura b); b) microestrutura com indicação da espessura do revestimento (3.07 μ m). Objetiva: 50X. Reagente: Tabela 22 do anexo D2.....	85

Figura 93 Mola do êmbolo e respetiva amostra; a) mola do êmbolo no estado inicial; b) amostra da mola.....	86
Figura 94 Microestrutura típica de um aço tratado. Reagente: <i>Villela's</i> ; a) objetiva: 10X; b) objetiva: 20X.....	86
Figura 95 Termobloco montado na máquina, com indicação da resistência, dos tubos da água, do termostato de segurança (20) e da sonda de temperatura (22).....	89
Figura 96 Modelo CAD com todas as alterações, pronto a ser implementado no <i>Abaqus®</i> , sendo visível que as arestas do termobloco não possuem chanfros ou raios e com indicação das dimensões principais dos tubos e do termobloco. Também é indicada a localização da sonda de temperatura (22) e do termostato de segurança (20) [5].	91
Figura 97 Pontos em análise no modelo: (20) termostato de segurança (nó 37221), (22) sonda de temperatura (nó 41268), (E) extremidade do termobloco (nó 5450) e (T) topo da saída do tubo da água (nó 19658).....	92
Figura 98 Evolução das temperaturas de cada um dos pontos em análise, ao longo de 60s do aquecimento do termobloco, considerando que este tem água no interior dos seus canais, desde o instante inicial.....	93
Figura 99 Distribuição espacial das temperaturas no termobloco (K), no instante $t=60s$	94
Figura 100 Evolução das temperaturas dos nós em análise, ao longo dos 72s da simulação, quando o termobloco possui água no seu interior.....	94
Figura 101 Distribuição espacial das temperaturas no termobloco (K), no instante $t=72$ (fim da simulação).....	95
Figura 102 Tubo da água seccionado, com o modelo fluídico no seu interior, para a identificação dos pontos considerados na análise do aquecimento da água: (A_{i1}) ponto no interior da água do patamar 1 (nó 91680), (A_{i2}) ponto no interior da água do patamar 2 (nó 91474), (A_{i3}) ponto no interior da água do patamar 3 (nó 93635), (A_{i4}) ponto no interior da água do patamar 4 (nó 93179) e (A_{i5}) ponto no interior da água do patamar 5 (nó 94885); (A_{e1}) ponto no exterior da água do patamar 1 (nó 1368), (A_{e2}) ponto no exterior da água do patamar 2 (nó 1566), (A_{e3}) ponto no exterior da água do patamar 3 (nó 1764), (A_{e4}) ponto no exterior da água do patamar 4 (nó 1962) e (A_{e5}) ponto no exterior da água do patamar 5 (nó 2160); (A_{is}) ponto no interior da água à saída (nó2317).....	96
Figura 103 Distribuição da temperatura na água parada (K), para o instante $t=60s$	96
Figura 104 Distribuição da temperatura na água em circulação (K), para o instante $t=72s$	97
Figura 105 Evolução das temperaturas no interior da massa fluído, ao longo dos 72s da simulação, em cada um dos patamares.	98
Figura 106 Evolução das temperaturas no exterior da massa fluído, ao longo dos 72s da simulação, em cada um dos patamares.	98
Figura 107 Evolução das temperaturas dos nós no interior e no exterior da massa de fluído, no patamar 1, durante os 72s da simulação.....	99
Figura 108 Evolução das temperaturas dos nós no interior e no exterior da massa de fluído, no patamar 5, durante os 72s da simulação.....	100
Figura 109 Evolução da temperatura no interior da água ao longo dos 72s da simulação.	100
Figura 110 Tubo da água em corte, com o modelo fluídico no seu interior, para a identificação dos pontos considerados na análise do tubo: (A_{i5}) ponto no interior da água do patamar 5 (nó 94885),	

(A _{e5}) ponto no exterior da água do patamar 5 (nó 2160) e (T ₅) ponto no exterior do tubo no patamar 5 (nó 73).....	101
Figura 111 Evolução das temperaturas no tubo da água (T ₅) (nó 73) e no interior (A _{i5}) (nó 94885) e no exterior da água (A _{e5}) (nó 2160), no patamar 5, durante os primeiros 60s da simulação. .	102
Figura 112 Evolução da temperatura na sonda de temperatura (22) no termobloco sem água e no termobloco com água, durante 60s da simulação, com indicação do instante em que cada uma atinge os 100°C.....	103
Figura 113 Evolução das temperaturas dos nós em análise, ao longo dos 100s da simulação, quando o termobloco não possui água no seu interior.	103
Figura 114 Modelação em <i>SolidWorks</i> ® [60], da versão mais recente do design geral da máquina, com a indicação das suas principais dimensões e com a identificação dos seus módulos: A) Módulo dispensador de cápsulas, B) Módulo de extração de café com dois grupo e C) Módulo de extração de vapor de água e água quente – adaptado de [79].	108
Figura 115 Modelação do carrinho em <i>SolidWorks</i> ® [60] – adaptado de [79]: a) conjunto do carrinho com a máquina e com indicação das dimensões do mesmo; b) carrinho com identificação de alguns dos seus principais detalhes.	109
Figura 116 Circuito hidráulico adaptado para o módulo do grupo de extração da nova máquina.	111
Figura 117 Conjunto motor e bomba rotativa selecionados para a nova máquina.....	112
Figura 118 Bancada de testes com o circuito hidráulico adaptado, praticamente montado.....	112
Figura 119 Modelação primordial, em <i>SolidWorks</i> ® [60], do protótipo do módulo de extração de café da nova máquina – adaptado de [82].	113
Figura 120 Planeamento das principais atividades experimentais realizadas. Os números entre parênteses correspondem ao número de dias atribuídos a cada tarefa.	125
Figura 121 Indicação dos <i>inputs</i> e <i>outputs</i> da placa eletrónica da máquina em estudo no capítulo 3.	126
Figura 122 Parafusos CBL, ISO 7045; a) Parafuso ISO 7045 - M5 x 30 - 4.8 - H, que faz a fixação entre a base metálica de suporte do grupo e a placa de suporte em plástico; b) Parafuso ISO 7045 - M5 x 8 - 4.8 - H, que faz a fixação entre a placa em plástico e o corpo da máquina.	127
Figura 123 Parafuso CHC ISO 4762 - M5 x 50, que garante a fixação do termobloco à base metálica de suporte do grupo.....	127
Figura 124 Reagentes utilizados nas ligas de alumínio; a) Keller's; b) HF (0.2%); c) Poulton's..	128
Figura 125 Reagente utilizado nas peças em latão.	129
Figura 126 Reagente <i>Villela's</i> utilizado na amostra da mola do êmbolo.....	130
Figura 127 Modelo <i>heat-transfer</i> , ao qual se atribui a designação <i>heat</i> [77].	132
Figura 128 Modelo CFD, ao qual se atribui a designação de <i>flow</i> [5].	132
Figura 129 Modelo <i>heat</i> (termobloco e tubos de água e da resistência) e modelo <i>flow</i> (massa de água a azul) juntos [5].....	132
Figura 130 Indicação da interface comum entre modelos [5]; a) tubo da água, pertencente ao modelo sólido, cuja superfície interior coincide com a interface comum representada a amarelo; b) modelo fluídico no interior dos tubos da água do modelo sólido, para demonstrar que a sua superfície exterior corresponde à superfície interior do tubo de água.....	133

Figura 131 Malha do modelo sólido [5]; a) malha tetraédrica no modelo sólido, sendo possível observar os tamanhos mais reduzidos dos elementos, juntos às zonas curvas. Destaque para uma porção do tubo da água; b) ampliação da entrada do tubo da água, destacado em a). Observa-se que o tubo tem elementos de tamanhos mais reduzidos enquanto o termobloco tem elementos maiores. Também se observa o aumento gradual do elemento de malha no termobloco, a partir do bordo do tubo, gerado pelo <i>Abaqus</i> ® [5].	134
Figura 132 Identificação do tipo de elementos da malha do modelo fluído, sem considerar as extensões [5]; a) malha no modelo fluídico, com destaque para uma zona em corte, na parte do modelo que se encontra no interior do tubo; b) interior da massa de fluído, sendo visíveis os elementos tetraédricos no interior do fluído e as camadas de elementos em cunha que constituem a camada limite. Note-se que a espessura das camadas aumenta à medida que se aproxima do interior.	135
Figura 133 Zona de transição entre a zona do modelo que fica no interior do tubo e a extensão criada, sendo possível observar que os elementos utilizados nas extensões resultam da extrusão das faces dos elementos existentes na zona do modelo que fica no interior do tubo [5]......	136
Figura 134 Condições de fronteira e condições iniciais no modelo sólido (<i>heat</i>); a) indicação do fluxo de calor (q) e dos valores da potência da resistência (P) e da sua área superficial, útil ao aquecimento ($A_{\text{útil da resistência}}$) (área da resistência no interior do bloco, representada a azul) e da área do bloco que está em contacto com a resistência ($A_{b,r}$); b) indicação da área superficial do bloco, em contacto com o ambiente, considerada nos fenómenos de transferências de calor por convecção (A_s) (indicada a azul), juntamente com o seu respetivo valor e com os valores do coeficiente natural de convecção (h_n) e da temperatura ambiental e inicial ($T_\infty = T_i$).	140
Figura 135 Síntese das condições fronteira aplicadas na massa de água (modelo fluídico).....	142
Figura 136 Condição barreira. A vermelho são assinaladas as superfícies "barradas" e a azul ficam as únicas entradas e saídas de água (as extremidades) [5]......	143

Índice de tabelas

Tabela 1 Resultados obtidos para a massa volúmica de cada termobloco (arredondados às centésimas) e para a dureza superficial média (arredondado às unidades), com uma carga de 20kg.	63
Tabela 2 Composição química das ligas de cada termobloco e identificação da liga de alumínio para fundição, registada pela <i>Aluminum Association</i> , com a composição mais próxima de cada uma (A336, A339, A361); (a) D, <i>die casting</i> (fundição injetada); P, <i>permanent mold casting</i> (fundição em coquilha) [67].....	64
Tabela 3 Indicação das partes dos termoblocos A, B e C utilizados para preparar, respetivamente, as amostras A, B e C1 e C2. Também são apresentados os valores médios finais de dureza obtidos para cada amostra (arredondados às unidades), com uma carga aplicada de 20kg.	65
Tabela 4 Composição química dos tubos da água e da resistência e da liga AISI 304 [71].....	71
Tabela 5 Massa volúmica da base (arredondado às centésimas) e dureza média superficial (arredondado às unidades), com uma carga de 20kg.....	73
Tabela 6 Composição química da liga da base e da liga A339 (a) P, <i>permanent mold casting</i> (fundição em coquilha) [67].....	73
Tabela 7 Massa volúmica do êmbolo da cápsula (arredondado às centésimas) e durezas médias da superfície e da amostra (arredondadas às unidades), com uma carga de 20kg.....	75
Tabela 8 Composição química da liga do êmbolo e indicação da liga registada com a composição química mais próxima [72].....	76
Tabela 9 Propriedades mecânicas de uma liga de alumínio puro tratada (1015 H14) e da liga de alumínio 6061 tratada (6061 T6) [73][74]; (a) os valores de dureza em Vickers [HV] são aproximados a partir dos valores de Brinell [HB] e resultam da consulta da tabela de conversões para ligas de alumínio disponível em [75].	77
Tabela 10 Valores das propriedades físicas da liga 6061 T6 [74].....	77
Tabela 11 Massa volúmica do aro (arredondado às centésimas) e durezas médias da superfície e da amostra (arredondadas às unidades), com uma carga de 20kg.....	77
Tabela 12 Composição química da liga do aro da suporte da mola e indicação da liga registada com a composição química mais próxima [72].....	78
Tabela 13 Composição química da placa permutadora de calor e da UNS nºC87900 [76].	80
Tabela 14 Massa volúmica de cada uma das peças roscadas (arredondados às centésimas) e durezas médias da superfície e da amostra (arredondadas às unidades), com uma carga de 20kg.	82
Tabela 15 Composição química das peças roscadas e da UNS nºC86400 [76].	83
Tabela 16 Massa volúmica da mola (arredondados às centésimas) e dureza média superficial (arredondada às unidades), com uma carga de 20kg.....	86
Tabela 17 Tabela resumo dos resultados obtidos na análise metalográfica de cada constituinte do grupo de extração.	87
Tabela 18 Valores teórico e calculado da potência da resistência elétrica.....	89
Tabela 19 Dados do material do canal da água (AISI 304) [71].....	89
Tabela 20 Dados do material do termobloco (liga A336) [67].	90

Tabela 21 Informação relativa aos reagentes utilizados nas amostras em ligas de alumínio [68].	128
Tabela 22 Informação relativa aos reagentes utilizados nas amostras em ligas de cobre [77].	129
Tabela 23 Informação relativa aos reagentes utilizados na amostra em aço [84].	129
Tabela 24 Unidades consistentes consideradas na simulação.	131
Tabela 25 Valores introduzidos para as propriedades do material do termobloco e do aço inoxidável do tubo da água [67] e [86].	137
Tabela 26 Propriedades da água [87].	137
Tabela 27 Valores da viscosidade dinâmica introduzidos, em função da temperatura [88].	137

1 Introdução

A presente dissertação é desenvolvida num período de cinco meses, no Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica (MIEM) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), na especialização de Produção, Conceção e Fabrico. Trata-se da primeira dissertação em engenharia a ser realizada no âmbito do projeto da nova máquina de café para a *BICAFÉ®*.

1.1 A *BICAFÉ®* e o projeto das máquinas e das cápsulas de café do futuro

Nos últimos anos, o consumo de café tem vindo a crescer a nível mundial [1], sendo que em Portugal não é exceção. De facto, estima-se que o mercado do café represente cerca de 5% da indústria alimentar do país [2], sendo que as máquinas de cápsulas representaram, em 2016, 84% das vendas de máquinas de café [3].

Neste contexto, a *BICAFÉ®*, uma multinacional portuguesa de torrefação e comércio de café, que produz e vende cápsulas compatíveis com diversos sistemas [4], reuniu um consórcio, que envolve a FEUP, o INEGI (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial) e um conjunto de outras empresas, para desenvolver uma nova geração de máquinas de café em unidoses (cápsulas) e de cápsulas biodegradáveis.

A longo prazo, o objetivo do projeto passa pelo desenvolvimento, sucessivo, de uma máquina dupla de unidoses, seguindo-se uma máquina industrial manual e, por fim, uma máquina industrial automática, tirando partido dos conhecimentos que vão sendo adquiridos nas fases anteriores. Por enquanto, pretende-se o desenvolvimento de uma máquina dupla de unidoses, completamente automática e “inteligente”, para implementação em escritórios ou negócios de pequenos volumes.

A sua forte componente tecnológica deve possibilitar, não só, um elevado grau de interação com o utilizador, mas, também, agilizar todo o processo de tiragem do café e de manutenção da máquina, bem como controlar os aspetos relacionados com os seus gastos energéticos. A estas componentes, acresce a intensão de conceber uma máquina com o máximo de incorporação nacional.

Procura-se, ainda, combater alguns dos problemas existentes nas máquinas atuais da empresa, identificados pelos clientes e pelos técnicos da *BICAFÉ®*, que se relacionam, sobretudo, com o período relativamente longo de tiragem do café, o que resulta numa incapacidade de resposta nos picos de consumo, e com a obtenção, esporádica, de cafés a temperaturas inferiores às desejadas.

Por último, falta referir que a realização desta primeira etapa do projeto foi dividida em duas fases principais, que passam, primeiro, pelo desenvolvimento de um protótipo funcional, utilizando os componentes das máquinas atuais e, posteriormente, pelo desenvolvimento de um protótipo funcional, cujos componentes principais são melhorados e, idealmente, fabricados em Portugal.

1.2 Contextualização da dissertação e motivação

As atividades realizadas durante a dissertação decorrem nas instalações da FEUP e do INEGI, sendo que oportunidade para sua concretização resulta do projeto da máquina dupla de unidoses, que está a ser desenvolvido para a *BICAFÉ®*.

Uma vez que os trabalhos da dissertação tiveram início com os trabalhos do projeto, as possibilidades de estudo eram muito variadas. No entanto, a principal motivação surge em tentar compreender os parâmetros funcionais da máquina de café e conhecer os componentes, que têm um impacto direto na qualidade dos cafés obtidos e na rapidez da sua preparação.

Neste sentido, as atividades desenvolvidas iniciam-se com o estudo detalhado de uma máquina dupla, em unidoses, atualmente comercializada pela *BICAFÉ®* e convergem para análise detalhada do seu grupo de extração.

Espera-se, assim, que os resultados obtidos possam contribuir para o posterior desenvolvimento de um novo grupo de extração otimizado, a incorporar na nova máquina.

1.3 Objetivos da dissertação

Numa fase inicial, os principais objetivos desta dissertação são:

- conhecer a constituição típica de uma máquina de café de unidoses e compreender o seu funcionamento;
- identificar o componente, ou conjunto de componentes, responsável pela preparação do café.

Uma vez compreendida a importância do grupo de extração, para o rendimento da máquina, as metas propostas são:

- estudar a constituição e o funcionamento do grupo de extração;
- caracterizar, metalograficamente, cada constituinte do grupo de extração e inferir acerca do seu processo de fabrico;
- iniciar o estudo do aquecimento do grupo de extração e da água para o café, efetuando uma simulação térmica dos mesmos.

1.4 Metodologia adotada

Os trabalhos da dissertação são caracterizados por uma forte componente experimental, mas têm início com a compilação de um conjunto de informação teórica. Esta está relacionada com a constituição e o funcionamento das máquinas de café e é essencial para compreender como são manipulados os seus diversos parâmetros.

As atividades experimentais começam com o estudo da máquina real disponibilizada pela *BICAFÉ®*, no qual se efetua a identificação dos seus diversos componentes e se faz o levantamento do seu circuito de funcionamento. O objetivo é perceber quais são os componentes com uma relação direta com a tiragem de cafés.

Em seguida, é efetuada uma análise detalhada ao grupo de extração, do ponto de vista funcional, metalográfico e térmico, sendo identificados e avaliados alguns problemas para, então, se proporem algumas sugestões de melhoria, em função dos resultados obtidos. Pretende-se que estes resultados auxiliem na futura conceção de um novo grupo de extração.

Por fim, fazendo uso da informação recolhida e dos conhecimentos adquiridos, é apresentada uma proposta de um novo circuito para o primeiro protótipo da máquina, que resulta da adaptação de alguns aspetos do circuito da máquina inicial.

Na Figura 120 do Anexo A encontra-se o planeamento das atividades experimentais, com a indicação aproximada do número de dias atribuído a cada tarefa.

1.5 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos principais, de acordo com o seguinte:

- **2 Estado da arte (página 5):** é efetuada uma abordagem à atualidade e às tendências futuras da indústria do café e do mercado das máquinas de café e são apresentados vários aspetos relacionados com o funcionamento das máquinas e com a sustentabilidade ambiental.
- **3 Arquitetura geral da máquina dupla de unidoses da BICAFÉ® (página 33):** é efetuado um estudo detalhado da máquina real, sendo apresentados e analisados todos os seus componentes e circuitos.
- **4 Análise do grupo de extração (página 51):** é analisada a constituição e o funcionamento do grupo de extração, seguindo-se a caracterização metalográfica de cada um dos seus constituintes e, por fim, a exposição e análise dos resultados obtidos na simulação térmica (efetuada com recurso ao *Abaqus®* [5]) do aquecimento do grupo e da água.
- **5 Desenvolvimento do protótipo funcional com os componentes originais (página 107):** é feita uma abordagem ao ponto da situação dos trabalhos realizados, até à data final da dissertação, no âmbito do primeiro protótipo funcional da máquina. É neste capítulo que é apresentada a proposta para o novo circuito da máquina.
- **6 Conclusões e trabalhos futuros (página 115):** apreciação global do trabalho realizado e sugestão de trabalhos futuros que possam ser desenvolvidos.

2 Estado da arte

A dimensão da indústria de café a nível global e o seu relativo grau de complexidade, com um variado número de intervenientes, colocam-na numa posição de destaque no panorama geral, sendo que as suas atividades contribuem com impactos económicos e ambientais significativos. Cabe às empresas que se insiram nesta indústria, procurar o desenvolvimento sustentável das suas atividades, do ponto de vista ecológico e económico, acompanhar a evolução das tecnologias e perspetivar tendências futuras, de modo a estar na frente da inovação e a garantir a satisfação dos seus clientes, com o mínimo de impacto ambiental.

Nesse sentido, este capítulo pretende consciencializar o leitor para a dimensão desta indústria com o objetivo de provar a importância do projeto que está a ser desenvolvido, bem como introduzir alguns conhecimentos necessários para uma melhor compreensão das atividades a realizar posteriormente.

2.1 Produção e consumo de café

A planta de café cresce naturalmente em áreas de clima tropical, com sol abundante, chuva moderada e temperaturas quentes [6], sendo comum a designação de *coffee belt* ou “faixa do café” (Figura 1) ao conjunto de regiões tropicais próximas da zona equatorial, onde é produzido o café [7].

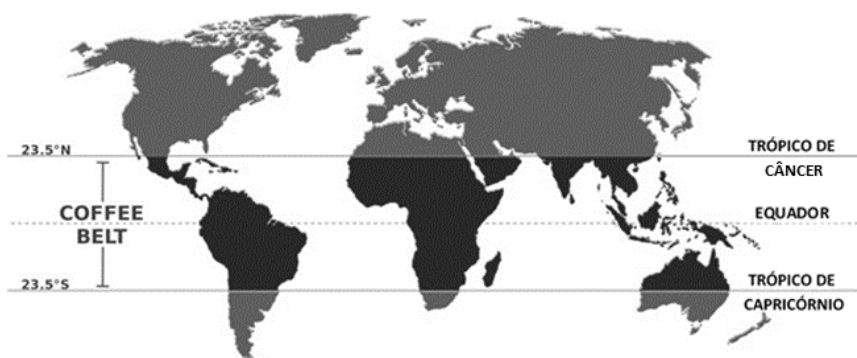


Figura 1 Localização do *coffee belt*, a região do globo na qual se concentram os maiores produtores e exportadores de café a nível mundial - adaptado de [8].

A partir de dados estatísticos publicados pela ICO (*International Coffee Organization* – Organização Internacional do Café) é possível avaliar a evolução da produção anual de café a nível mundial, entre 2013 e 2016, bem como a contribuição de cada uma das regiões do *coffee belt* para a produção total de cada ano (Figura 2) [9].

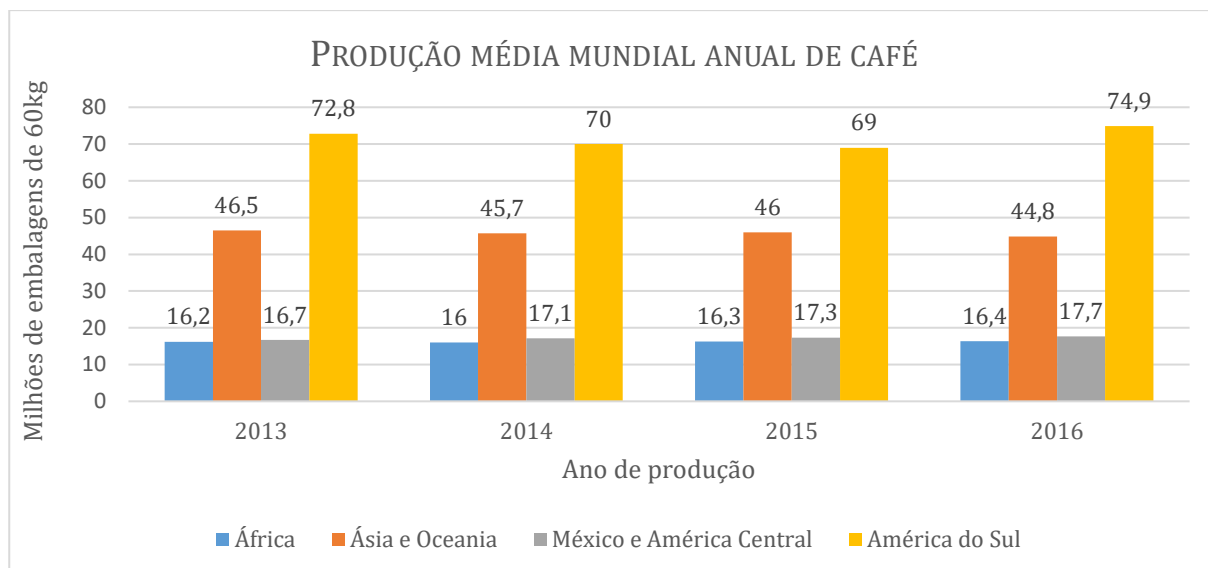


Figura 2 Produção média anual de café (em milhões de embalagens de 60kg) a nível mundial de cada região exportadora de café, entre 2013 e 2016 - adaptado de "Trade Statistics Tables: Total production by exporting countries" [9].

Embora existam algumas oscilações na quantidade total produzida de café, verifica-se que se produziram, em 2016, um total aproximado de 153.8 milhões de embalagens de café de 60kg (aproximadamente 9.2 milhões de toneladas), o que representa um aumento de cerca de 1.5%, em relação ao ano anterior. De entre as quatro regiões produtoras e exportadoras de café, a América do Sul detém, em média, 47% do total produzido em cada ano [9].

Se, por um lado, existem oscilações na quantidade de café produzida ao longo dos anos, por outro, o consumo de café a nível mundial tem registado um aumento contínuo nos últimos quatro anos, de acordo com os dados disponibilizados pela ICO. Na Figura 3 é possível analisar a evolução do consumo de café a nível mundial, no período 2012/13 a 2015/16, e avaliar a contribuição dos países exportadores e importadores para o consumo total de café [1].

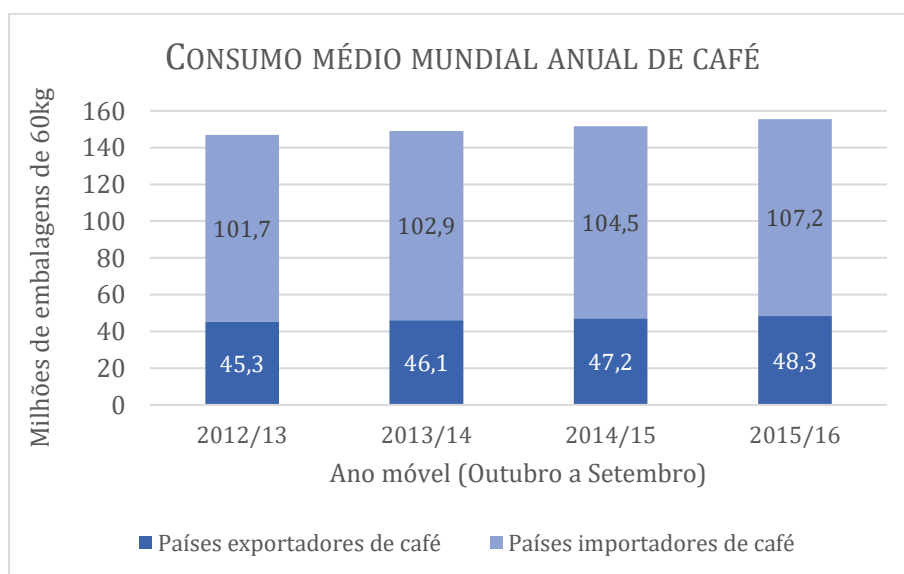


Figura 3 Consumo médio anual de café (em milhões de embalagens de 60kg) a nível mundial, de 2012 a 2016, para países importadores e exportadores de café - adaptado de "Trade Statistics Tables: World Coffee Consumption" [1].

Numa primeira análise, em 2015/16 estima-se um consumo de 155.5 milhões de embalagens de 60kg de café (aproximadamente 9.3 milhões de toneladas) a nível mundial. Regista-se, ainda, uma taxa de crescimento média anual de 1.9% no consumo de café, desde 2012, sendo que os países importadores são os maiores consumidores.

Numa segunda análise, mais detalhada, conclui-se que a taxa de crescimento média do consumo de café, entre 2012/13 e 2015/16, nos países exportadores (2.1%) é mais significativa do que nos países importadores (1.8%). De facto, no que respeita ao consumo de café, os primeiros possuem um potencial de crescimento superior, pelo que, a manterem-se estas tendências, a expansão do negócio da venda de café para estes países pode ser bastante rentável [1].

A Figura 4 e a Figura 5, resumem, respetivamente, a partição do consumo total de café, em 2016, pelos diversos continentes e a taxa de crescimento média anual do consumo de café, de cada continente, entre 2012 e 2016 [1].

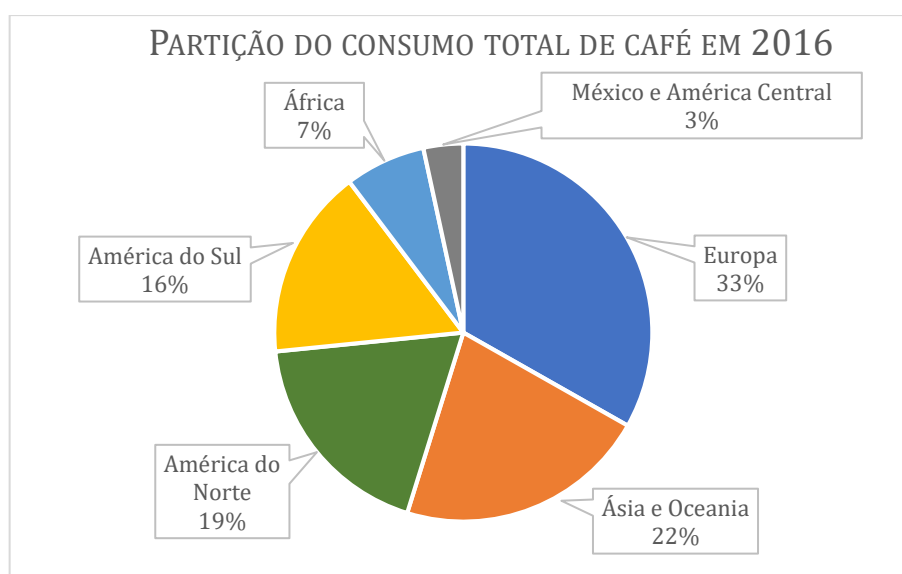


Figura 4 Partição do consumo total de café pelas diferentes regiões do globo no ano de 2016 - adaptado de "Trade Statistics Tables: World Coffee Consumption" [1].

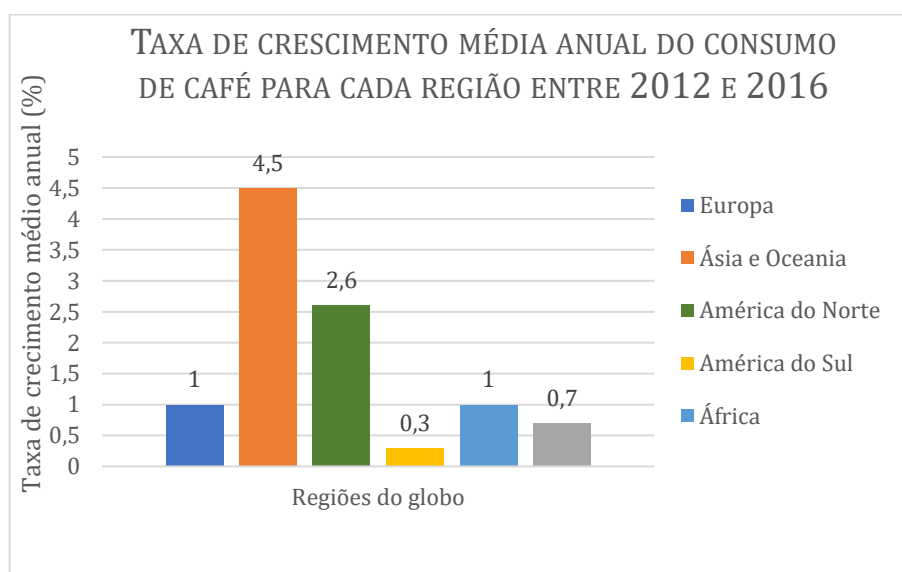


Figura 5 Taxas de crescimento médias anuais de consumo de café de cada região do globo, entre 2012 e 2016 - adaptado de "Trade Statistics Tables: World Coffee Consumption" [1].

Aliando as figuras anteriores à Figura 2 e à Figura 3, é possível retirar algumas conclusões gerais, no que diz respeito à produção e consumo de café a nível global, nomeadamente:

- a quantidade de café produzida apresenta oscilações, sendo que o maior produtor de café atual é a América do Sul, seguindo-se a Ásia e a Oceania (Figura 2);
- o consumo de café regista um aumento contínuo (Figura 3), sendo que o maior consumidor atual é a Europa (33%), seguindo-se a Ásia e a Oceania (22%) e a América do Norte (19%) (Figura 4);
- relativamente ao consumo, a Europa apresenta uma taxa de crescimento média anual muito reduzida (1%) em comparação com a Ásia e a Oceania (4,5%) ou a América do Norte (2,6%), que lhe precedem (Figura 4 e Figura 5).
- a Ásia e Oceania ocupam uma posição cada vez mais interessante no panorama geral da indústria do café, tanto em nível produtivo, como em nível de consumo [1].

A nível nacional é importante referir que Portugal é um dos membros da ICO, fazendo parte do conjunto de países importadores de café. Estima-se que o mercado do café represente cerca de 5% da indústria alimentar do país [2], movimentando, aproximadamente, 556 milhões de euros [3].

O consumo médio anual de café em Portugal ronda os 4,7 a 5kg por pessoa [10]. Contudo, de acordo com um estudo realizado por Tiago Oliveira [11] sobre as tendências e perspetivas sociais no consumo de café em Portugal, prevê-se que, até 2021, o consumidor português atinja os 8kg anuais, duplicando o consumo atual.

Entre 2016 e 2017, o café cresceu a um ritmo superior ao da média dos bens de grande consumo nos hiper e supermercados e nos estabelecimentos tradicionais. O motor deste dinamismo tem sido os cafés torrados, que valem cerca de 75% do negócio das bebidas quentes, seguindo-se os chás e as infusões. Dentro dos cafés torrados, destaca-se o segmento das cápsulas, que ganha cada vez mais peso. O aparecimento das cápsulas alterou e continua a modificar a forma como se consome o café e são as principais responsáveis pelo crescimento da categoria. Há cada vez mais lares a consumi-las, em detrimento do café em grão, em pastilhas ou moído [3].

Segundo Cláudia Pimentel, secretária geral da AICC (Associação Industrial e Comercial do Café), começa a surgir um novo público, normalmente entre os 18 e os 44 anos, que procura lotes *premium* e diferenciados de café, não se contentando já com os produtos mais tradicionais. Este público, que procura comodidade e variedade de cafés, tem vindo a preferir o consumo de café em cápsula, aumentando significativamente a quantidade de café consumida em Portugal, principalmente, na categoria de café para casa [10].

2.2 A cadeia de logística do café

O café é uma das bebidas mais consumidas no mundo e é a segunda mercadoria mais comercializada a nível global, a seguir ao petróleo [12][13].

Contudo, desde a planta de café até ao copo de bebida, são muitos os intervenientes que transformam a cadeia de abastecimento do café, ou cadeia de logística (*coffee supply chain*), num processo complexo, com impactos ambientais, económicos e sociais significativos, a nível regional e mundial. Desta forma, as empresas que procurem um desenvolvimento sustentável da sua cadeia de abastecimento, necessitam de informação ambiental e económica acerca das etapas da cadeia de abastecimento externas à sua atividade [13].

Os objetivos a serem seguidos no sentido de um consumo e de uma produção sustentável são interpretados de modo distinto por vários autores, mas existe um conjunto de elementos que são aceites por todos. No que diz respeito à dimensão ambiental, devem ser procuradas melhorias radicais da eficiência dos recursos e da redução dos impactos ambientais. Em relação à dimensão económica, o objetivo é realizar um crescimento equitativo. Por fim, na dimensão social, são necessários esforços para garantir circunstâncias sociais aceitáveis [14].

2.2.1 Impacto socioeconómico

O café é o produto agrícola tropical mais valioso e amplamente comercializado a nível mundial, sendo que 80% da sua produção é realizada por 25 milhões de pequenos agricultores [15]. Este é produzido, essencialmente, em países em desenvolvimento, mas é nos países industrializados que se encontram a maioria dos consumidores de café.

Para os países produtores, a exportação do café representa uma porção significativa da receita nacional, sendo, também, uma fonte vital de rendimento para os governos locais, que usam o café como uma forma de negociação com países estrangeiros, para melhorar os seus serviços nacionais de saúde, educação e infraestruturas, entre outros serviços sociais. Por exemplo, no Burundi o café representa cerca de 60% das exportações nacionais, nas Honduras representa cerca de 25% e, na Nicarágua, representa cerca de 20%.

O valor do mercado global de café é estimado em 70 bilhões de euros, mas a cadeia de abastecimento do café é dominada por um pequeno número de empresas multinacionais de comércio e torrefação. Destas, a ECOM, a Neumann e a Volcafe controlam cerca de 50% do comércio global de café e dez torrefadoras, às quais pertence a Nestlé, processam quase 40% do café consumido mundialmente. Assim, enquanto o café é um negócio altamente rentável para as grandes multinacionais associadas ao setor da alimentação nos países industrializados, para os produtores, torna-se cada vez mais difícil sobreviver com a produção de café [16].

De facto, o valor de revenda do café retido pelo produtor caiu nas últimas décadas. Se, em 1970, os produtores angariavam cerca de 20% do valor do café vendido numa loja, atualmente, com o excesso de oferta e em consequência da crise do café, ocorrida entre 1994 e 2004, os produtores recebem, apenas, 1 a 3% do valor de um copo de café vendido na Europa ou na América do Norte e 2 a 6% do valor do café vendido em supermercados [16].

A nível global, a queda dos preços está associada ao aumento do desemprego e da pobreza nos países exportadores. Em simultâneo, os lucros obtidos com o café nos países importadores mantêm-se, ou até aumentam, devido à aplicação de um conjunto de estratégias de *marketing*, que passam pela introdução de novas marcas ou à incorporação de outras atividades, produtos ou serviços que, vendidos em conjunto com o produto propriamente dito do café, geram um valor adicional para o consumidor [13].

Além disso, a planta do café é muito fustigada por doenças e pestes e é muito sensível às variações de temperatura e à chuva, pelo que existe uma margem restrita de condições ideais, fora das quais, o seu rendimento e a qualidade do seu grão diminuem. As alterações climáticas nas zonas tropicais do globo, associadas ao reduzido capital dos produtores para investir em tecnologias que melhorem a sua capacidade produtiva, originam uma dificuldade crescente no cultivo e produção do café [17].

Por todas estas razões, existem, atualmente, várias iniciativas que promovem o comércio justo (ou *fair trade*, em inglês) e a produção sustentável de café. A par deste movimento, surgem, também, vários autores que põem em causa o contributo real do comércio justo para a produção sustentável do café, tomando-a como uma simples estratégia de *marketing* que ajuda na

modelação da imagem de marca das companhias. Num estudo desenvolvido por [18] é repensado o real contributo do comércio justo para o desenvolvimento de um mercado de café sustentável.

2.2.2 Impacto ambiental

A cadeia de abastecimento de café começa com processos agrícolas em países tropicais e termina com as etapas de consumo e descarte, predominantemente em países industrializados. Na Figura 6 estão representadas as principais fases desta cadeia, em conjunto com os seus principais impactos ambientais [13].



Figura 6 Principais fases da cadeia de abastecimento do café, com referência aos principais impactos ambientais - adaptado de [13].

É de realçar, também, o transporte que, embora não esteja representado na Figura 6, ocorre praticamente entre todas as fases. A maior distância a percorrer ocorre na exportação dos grãos

de café entre os países produtores e consumidores. O transporte está associado ao uso considerável dos recursos naturais, como é o caso dos combustíveis fósseis.

A quantificação dos impactos apresentados anteriormente é possível a partir de uma avaliação mais detalhada do LCA (*life cycle assessment* – avaliação do ciclo de vida). O LCA é um método definido pela ISO (*International Organization for Standardization* - Organização Internacional de Normalização) 14040-14044, para avaliar o desempenho ambiental de um produto [19][20]. Estes detalham a sua progressão, documentando os recursos naturais consumidos (minerais, energia e água) e as emissões em cada fase da vida, desde a produção do material, passando pelo fabrico e uso do produto até ao fim de vida, permitindo uma estimativa do seu impacto geral. Após um processo de classificações, normalizações e conversões dos impactos em medidas quantificáveis, obtém-se o indicador ecológico de cada fase [21].

São vários os autores que realizaram análises do ciclo de vida do café, nos quais a comparação dos indicadores ecológicos entre todas as fases, revela que, em média, as fases de consumo e fim de vida, juntas, representam cerca de 41% dos impactos ambientais da indústria. Uma vez que o consumo de café continua a aumentar (secção 2.1), estes valores adquirem uma dimensão significativa à escala global dos impactos ambientais [22][23].

A consciência do impacto e da dimensão da indústria a nível global é fundamental pois, só assim, é que é possível desenvolver produtos que satisfaçam as necessidades da maioria dos intervenientes. É neste contexto que as empresas procuram, cada vez mais, o desenvolvimento de máquinas ecológicas, com garantias do “comércio justo” e com produtos associados que sejam amigos do ambiente. Os capítulos seguintes são dedicados a diversos aspetos relacionados com as máquinas de café.

2.3 A origem e a evolução das máquinas

O aumento crescente do consumo de café tem motivado uma série de evoluções tecnológicas nas máquinas, que permitem um controlo mais preciso dos seus parâmetros de funcionamento e, conseqüentemente, a obtenção cada vez mais fácil, cómoda e ecológica de um café de qualidade. Mas o que se entende por qualidade de um café?

A qualidade da bebida de café preparada depende da qualidade do café utilizado, das misturas de café, das condições de torrefação dos grãos de café, da moagem dos grãos de café torrados e, ainda, dos vários métodos de preparação [24]. Destes, só os métodos de preparação é que estão associados à máquina de café utilizada. De um modo geral, todos os tipos de bebidas de café necessitam de uma quantidade específica de grãos de café, com água a uma determinada temperatura, sujeita a uma pressão específica, durante um certo período de tempo. No entanto, é o modo como estes parâmetros variam na máquina, que determina a qualidade final do café obtido [25].

Num estudo realizado por Giovanni Caprioli [26], analisaram-se os odorantes e os perfis sensoriais do café obtidos em duas máquinas distintas, em que uma operou a temperaturas e pressões constantes de 92°C e 9bar, respetivamente, e a outra operou em condições instáveis de temperatura e pressão. A análise de odorantes foi efetuada pela quantidade de componentes voláteis presentes nas amostras, em sucessivos ensaios. Verificou-se que, na máquina que operava a temperatura e pressão constantes, a quantidade libertada de “odorantes positivos” para o aroma do café é muito superior à registada na máquina que operava em condições instáveis de temperatura e pressão.

Assim, a qualidade do café está muito dependente da capacidade da máquina em manter pressões e temperaturas de funcionamento constantes. A temperatura e a pressão são dois parâmetros de funcionamento fundamentais numa máquina de café, sendo determinante que esta possua uma arquitetura que vá nesse sentido. Quando aliados a um controlo eficaz da duração da tiragem do café, do volume do café final e da relação quantidade café/volume de água, permitem a obtenção de cafés de grande qualidade.

A crescente perceção da importância do controlo destes parâmetros para a obtenção de cafés de qualidade, esteve na origem das principais evoluções tecnológicas das máquinas.

2.3.1 Breves referências históricas

A origem das máquinas de café expresso remonta ao início dos anos de 1900, quando o pioneiro Bezzera [27] patenteou uma máquina (Figura 7 a), na qual, a água contida numa caldeira, era aquecida acima da sua temperatura de ebulição (acima de 100°C) para gerar pressão, permitindo a obtenção de água quente e vapor de água. Este sistema era relativamente rápido, em comparação com os métodos de preparação do café da época. No entanto, como a máquina era aquecida através de uma chama, tornava-se difícil controlar a temperatura e a pressão, o que prejudicava a qualidade final do café. Também a necessidade de temperaturas bastante altas para a obtenção dos níveis de pressão desejados, provocava a libertação de substâncias, normalmente insolúveis, que resultavam num sabor amargo e desagradável do café.

Em 1903, Pavoni comprou as patentes de Bezzera e introduziu alguns melhoramentos (Figura 7 b), tanto a nível do *design*, como a nível técnico, com a introdução de uma válvula de segurança, que ajuda a libertar a pressão nos grupos de extração, evitando libertações repentinas de pressão, juntamente com café e água remanescente nos porta filtros [28].

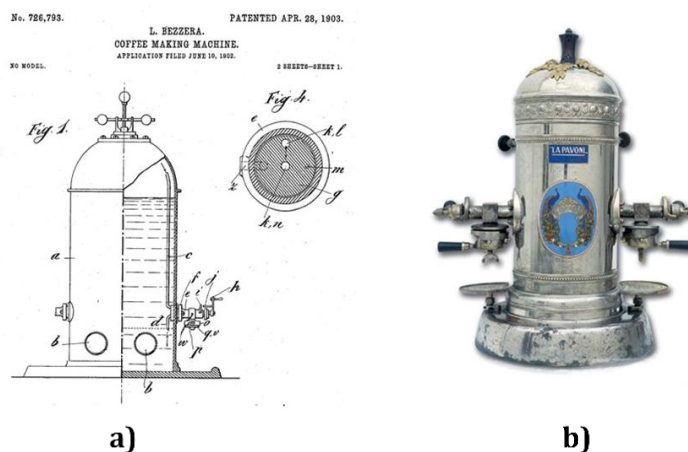


Figura 7 Primeira máquina de café expresso; a) representação esquemática do funcionamento da máquina patenteada por Bezzera em 1903 [27]; b) máquina real de Bezzera após aperfeiçoamentos desenvolvidos por Pavoni em 1906 [28].

O grande avanço na direção da preparação moderna do expresso foi a perceção de que era necessário um sistema que separasse as gerações de pressão e de temperatura.

Após a máquina de ar comprimido patenteada por Francesco Illy [29], foi desenvolvido um sistema de alavanca. O seu princípio de funcionamento passava pela aplicação manual de pressão para fazer contrair uma mola e pela posterior libertação da energia armazenada para a água, contida numa câmara de pressurização.

Os subseqüentes desenvolvimentos na eletricidade permitiram o automatismo crescente das máquinas de café, sobretudo no que diz respeito à possibilidade de aplicar pressão e efetuar o aquecimento com recurso, respetivamente, a bombas e resistências elétricas [25]. De facto, os aspetos tecnológicos são cada vez mais importantes, pois permitem um controlo mais eficaz dos parâmetros de funcionamento da máquina.

2.3.2 Estudo do mercado atual

As bebidas de café e as preferências do consumidor sobre os hábitos de beber café são muito variadas, sendo igualmente diversificados os métodos de preparação do mesmo.

É possível distinguir dois grandes grupos de equipamentos de acordo com a sua aplicação final, nomeadamente, os equipamentos para uso doméstico e os equipamentos para uso profissional, embora as sucessivas evoluções tecnológicas das máquinas tornem esta diferenciação cada vez mais reduzida. Opta-se por fazer esta distinção pois, a nível profissional, os tempos de preparação e a qualidade do café são particularmente importantes, pelo que nem todos os tipos de máquinas cumprem, com igual eficiência, estas necessidades.

Atualmente, existem vários tipos de máquinas de café elétricas, desde as máquinas de gotejamento num filtro e as máquinas com manípulo de porta-filtros, até às máquinas de café de unidoses (de pastilhas ou cápsulas) ou, mais recentemente, as máquinas completamente automáticas [30]. Nas Figura 8 a) a d) são apresentadas algumas das máquinas de uso doméstico existentes no mercado, representativas dos tipos referidos.



Figura 8 Vários tipos de máquinas de café elétricas existentes no mercado; a) máquina de gotejamento num filtro, *Philips HD7457/20* [31]; b) máquina manual com manípulo porta-filtros, *Philips Saeco Poemia HD8327/47* [32]; c) máquina de café unidoses (cápsulas), *Vianté SprezzoLuxe CAF-SP5* [33]; d) máquina de café completamente automática *Philips Saeco Intelia HD8753/87* [34].

De acordo com Pedro Araújo [3], as máquinas de cápsulas representaram, em 2016, 84% das vendas de máquinas de café, com uma penetração no mercado português de 59%. Em Portugal, o grande motor do aumento de consumo de café, sobretudo em casa, prende-se com o aumento significativo da quota de mercado alcançada por este tipo de máquinas, que se destacam

pela comodidade que oferecem num contexto de uma sociedade com estilo de vida cada vez mais acelerado.

Na verdade, a categoria das unidoses é a líder do mercado doméstico, não só no café, mas, de um modo geral, em todo o setor das bebidas quentes, tendo registado uma taxa de crescimento média anual de 18%, entre 2011 e 2016, a nível global. Contudo, esta taxa decresceu significativamente em 2015 e prevê-se que, em 2021, a taxa de crescimento anual seja de apenas 5% (Figura 9) [35].

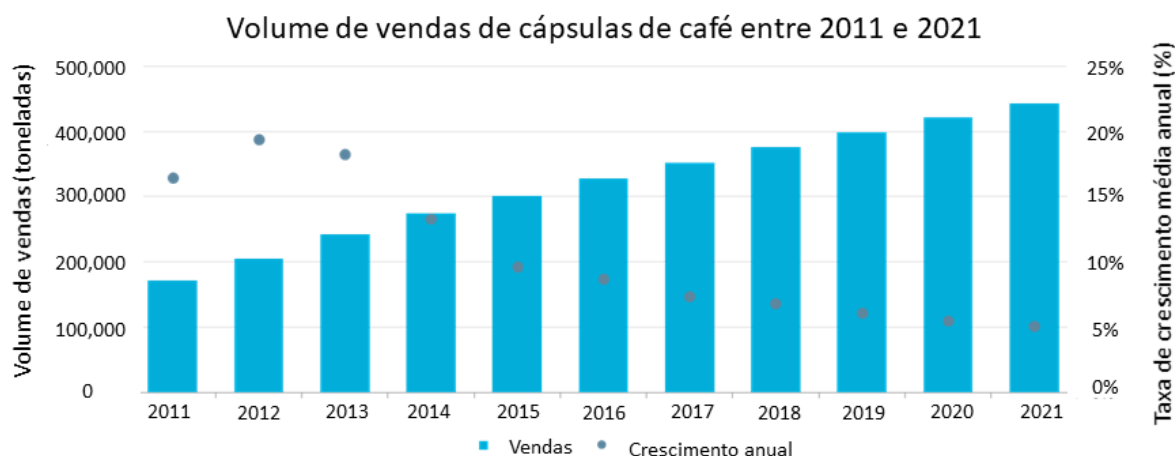


Figura 9 Evolução do volume de vendas (em toneladas) e da taxa de crescimento média anual das cápsulas de café, ocorridas e previstas, entre 2011 e 2021 - adaptado de [35].

Por norma, o café de cápsula é comparativamente mais caro do que as restantes opções, sendo um “luxo” dos países desenvolvidos, nomeadamente, dos países da América do Norte e da Europa e da Austrália. No futuro, espera-se um grande crescimento desta categoria nos países em desenvolvimento. Por enquanto, a incapacidade de expandir a categoria das unidoses para o mercado dos países em desenvolvimento numa quantidade suficiente para compensar um mercado, cada vez mais maduro, nos países desenvolvidos, levou a um decréscimo da taxa de crescimento anual média. Também a crescente preocupação com a questão da sustentabilidade está na origem deste abrandamento no crescimento da categoria, sobretudo no norte da Europa, onde se tem verificado um maior cuidado com as questões ambientais relacionadas com as cápsulas.

Com o aparecimento de cada vez mais marcas no mercado das unidoses, os preços unitários por máquina têm vindo a diminuir, levando ao aparecimento de um novo público na categoria, muito orientado para a relação custo/benefício e bastante mais ponderado nos investimentos que faz. Desta forma, as estratégias de *marketing* devem incluir este novo público que, não tendo tanto poder económico como o inicial, terá tendência a crescer no futuro [35].

A nível doméstico, o uso de equipamentos que realizam a preparação da bebida de café de forma completamente autónoma (Figura 8 d), desde a moagem do grão de café até à preparação propriamente dita, passando pela dosagem do pó, compressão, bombagem da água quente à pressão requerida e pela expulsão da borra para um recipiente de armazenamento, tem conquistado mercado. Contudo, os tempos de preparação longos, a necessidade de manutenção e limpeza regulares, a inconsistência na moagem e a presença de sistemas complexos que não possuem a longevidade e robustez necessárias à atividade profissional, levam a que a utilização

de máquinas completamente automáticas no mercado HORECA (canal ho[téis]/res[taurantes]/ca[fés]) seja muito reduzida, se não nula.

Atualmente, a grande maioria, senão a totalidade dos equipamentos profissionais usados em clientes do canal HORECA são equipamentos manuais tradicionais, que permitem o aperto, por um sistema de baioneta, de um manípulo onde é previamente depositado o café devidamente moído, em quantidade singular ou dupla (Figura 10 a). Estas estão associadas à possibilidade de permitirem a preparação de uma bebida de café de melhor qualidade, por garantirem temperaturas e pressões elevadas e estabilizadas no fornecimento de água. Uma vez preparada a bebida, é necessário esvaziar o porta-filtros e colocar novo pó de café para a preparação da próxima bebida.

Ultimamente, começam a aparecer máquinas de cápsulas com vocação para o mercado profissional, que dispõem de um grupo (ponto da máquina onde se prepara o café) adaptado. Tal como nas máquinas tradicionais, onde o café é depositado manualmente no porta-filtros, também nestas máquinas é necessário que o utilizador introduza as cápsulas, de modo manual. A complexidade de materiais e sistemas associados aos grupos, para possibilitar a compressão da cápsula, colocam estas máquinas num nível inferior de qualidade e robustez, em relação às tradicionais. Também os tempos de preparação acabam por ser um pouco mais longos do que o nas máquinas com manípulo porque é necessário esperar que o sistema comprima a cápsula. Contudo, a preparação de bebidas recorrendo a este tipo de máquinas é mais prática e cómoda, pois não há necessidade de limpar e repor o café do porta-filtros, antes de cada tiragem.

Aos aspetos técnicos apresentados para cada tipo de máquina, acresce o modo como o café moído é preservado, em cada caso, antes de ser servido, pois, para garantir que a sua qualidade é preservada ao longo do tempo, é importante que o pó de café esteja hermeticamente selado no interior de uma embalagem, protegendo-o do contacto direto com o ar, da luz, da humidade e do calor e do frio. Tal acontece porque, durante a torrefação, as gorduras existentes no grão de café começam a concentrar-se na sua superfície exterior, estando mais expostas ao oxigénio. Quando os grãos são moídos, a área de café em contacto com ar é maior e este problema intensifica-se [36].

É neste sentido, que as máquinas em unidoses apresentam algumas vantagens em relação às máquinas tradicionais. De facto, as cápsulas, sobretudo as que possuam uma camada de alumínio, que ajuda a evitar a infiltração de oxigénio para o interior da mesma, conservam melhor as propriedades do café, por longos períodos de tempo, em comparação com os métodos tradicionais, onde o café é mantido dentro do moinho até que seja servido [36].

Em Portugal, tem-se vindo a registar uma crescente introdução das máquinas de cápsulas no mercado HORECA, bem como uma maior preocupação em desenvolver cápsulas amigas do ambiente [10]. De facto, as tendências são para um aumento crescente deste tipo de máquinas no mercado profissional, pela comodidade que oferecem, todavia, é necessário efetuar algumas alterações de modo a melhorar a sua robustez e sua eficiência energética. Na Figura 10 b) encontra-se a máquina dupla de unidoses da *BICAFÉ®*, produzida pela *Ascaso®*, existente no mercado profissional português.



Figura 10 Máquina de café profissionais Ascaso® - adaptado de [37]; a) máquina *BAR ONE*, com manípulo e dois grupos; b) máquina *BAR KAP*, de unidoses com dois grupos.

As máquinas industriais existentes no mercado conseguem satisfazer as necessidades dos consumidores. No entanto, existem alguns encargos, sobretudo, nos elevados consumos energéticos, devido à incapacidade ou dificuldade em gerir a atividade dos grupos, e no tempo de espera. Assim, embora a tendência seja para uma crescente afirmação das máquinas de cápsulas, devido à comodidade que oferecem, a incorporação de funções inovadoras, que permitam recorrer às mais recentes tecnologias para controlar os parâmetros de funcionamento da máquina de modo eficiente, é fundamental.

As máquinas mais sofisticadas que existem atualmente no mercado são as máquinas *high-tech*, que permitem o controlo remoto da mesma através de uma aplicação móvel. Tratam-se de “máquinas inteligentes” e interativas adaptadas para uma indústria em desenvolvimento, a indústria 4.0.

2.3.2.1 A indústria 4.0

Se as três primeiras revoluções industriais se deveram à mecanização, à eletricidade e à Tecnologia da Informação (TI), a quarta Revolução Industrial, a Indústria 4.0, é suportada pela introdução da *Internet of Things* (IoT), ou internet das coisas, e pela interação dos mundos virtual e físico, totalmente integrados num ambiente de *cloud computing*.

A inovação da indústria denominada Indústria 4.0 passa por transformar a produção num ambiente de interação entre equipamentos, componentes e produtos inteligentes (“*connected automation*”), que trocam autonomamente mensagens para suportar todas as ações necessárias ao longo do processo de produção.

Uma das áreas na qual se tem verificado um desenvolvimento significativo, no âmbito da interação entre equipamentos, é a das “cozinhas inteligentes”. São já várias as empresas que têm modificado alguns dos eletrodomésticos típicos da cozinha, tornando-os em algo mais, que vai para além das suas típicas funcionalidades. Por exemplo, a *Samsung*® já desenvolveu um frigorífico “inteligente” que, incorporando um conjunto de câmaras no seu interior, nos dá conhecimento dos alimentos que estão em falta, através de uma *app* para o telemóvel. Este aparelho dispõe, ainda, de um ecrã tátil na parte exterior da sua porta, no qual o utilizador pode monitorizar um conjunto de funções, mas, também, interagir, fazendo a seleção de músicas, consultando a meteorologia, introduzindo notas, criando calendários, entre outras coisas [38].

O futuro tende, claramente, para um mundo cada vez mais tecnológico e interativo. Neste contexto, as tendências das máquinas de café passam pela sua adaptação a este novo meio,

permitindo a agilização de todo o processo de produção do café e facilitando as tarefas, não só do consumidor, mas também dos fornecedores ou técnicos da máquina. Para além desta componente de interação com as pessoas, a eletrónica aliada à IoT, permite um controlo exato dos parâmetros do funcionamento, possibilitando a obtenção de cafés de maior qualidade e, também, a gestão mais eficiente dos consumos energéticos. Um estudo de mercado, efetuado por *Technavio* [39], prevê um crescimento médio anual entre 2017 e 2021, de 39% nas vendas das máquinas inteligentes e automáticas.

Atualmente, já existem algumas máquinas de café desenvolvidas neste sentido. A *Smarter* (Figura 11 a), proveniente da Arménia, é uma “máquina inteligente” que se encontra conectada à rede Wi-Fi, permitindo, através de uma aplicação para o telemóvel, o agendamento de uma tiragem de café, o controlo da quantidade de café a tirar ou, até mesmo, a gestão do nível de água existente no depósito. O seu preço no mercado é de 140€ [40].

Também Wenyao Cai, finalista do *Electrolux Design Lab* desenvolveu um novo conceito para uma máquina de café, ao qual atribuiu o nome de *memory* (Figura 11 b). Esta é capaz de memorizar as preferências inseridas pelo utilizador durante o processo de instalação e reconhecê-las, a partir da sua impressão manual. Aceita, ainda, múltiplas impressões manuais e tira diferentes tipos de café para cada pessoa. No entanto, não existem informações sobre preços ou disponibilidade [41].



Figura 11 Máquinas inteligentes; a) Máquina de café *Smarter* [40]; b) máquina *memory* [41].

A IoT promete ir para além de “casas inteligentes”, conectando indústrias e criando “cidades inteligentes”, onde todas as atividades são controladas. Uma das razões pelas quais vários governos têm incentivado o desenvolvimento da IoT, prende-se com a possibilidade de poupar recursos, já que toda a gestão logística fica facilitada [42].

2.4 Os principais componentes das máquinas

As máquinas de café atuais apresentam um princípio base de funcionamento similar entre si, possuindo determinados conjuntos de componentes que são transversais a todas as máquinas, independentemente do seu tipo.

No entanto, as características técnicas individuais dos componentes e a forma como estes são agrupados variam de máquina para máquina, em função da sua aplicação final, das exigências funcionais do tipo específico da máquina e dos objetivos que se pretendam obter, no que diz respeito à qualidade da bebida obtida, aos tempos de preparação, à eficiência energética ou até à compactação da própria máquina. Na Figura 12 estão esquematizados os principais componentes que constituem uma máquina de café.

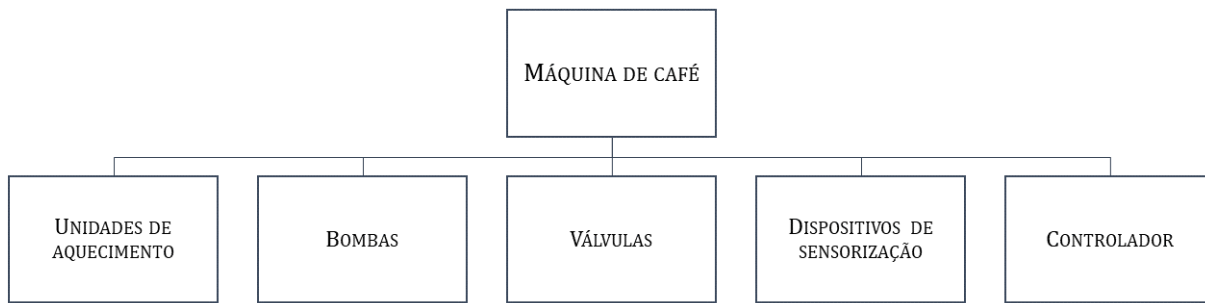


Figura 12 Apresentação dos principais grupos de constituintes de uma máquina de café atual.

Cada um dos conjuntos de componentes apresentados está implementado no circuito termo-hidráulico da máquina com uma função específica, à exceção do controlador que diz respeito, apenas, à parte elétrica da máquina. Este tópico é abordado posteriormente em maior detalhe.

Em ambiente profissional, independentemente do tipo de máquina, para além da obtenção rápida de um café de qualidade, também é pretendida a obtenção de água quente e vapor de água consistentes, em tiragens consecutivas de café. Obviamente que a máquina ideal é a que alia tudo isto a uma boa eficiência energética. Já a compactação da máquina, neste tipo de mercado, não é uma prioridade.

Assim, no que diz respeito às **funções que realizam**, a constituição das máquinas pode ser dividida em **dois grandes módulos** (Figura 13):

- o **módulo de extração**, onde se encontra o grupo de extração, que permite a preparação e a obtenção do café;
- o módulo de obtenção de **água quente e de vapor de água**, utilizado na preparação de outras bebidas, nas respetivas saídas.

As **máquinas de café de unidosos** e, em particular, as de cápsulas, também são capazes de cumprir estas duas funções, diferenciando-se das demais apenas pela necessidade de possuírem um **grupo de extração adaptado** para a alocação, compressão e expulsão das cápsulas. Para além do grupo de extração e do mecanismo utilizado para comprimir as cápsulas, que varia entre as máquinas deste tipo, todos os restantes conjuntos de componentes são semelhantes.

Na Figura 13 está representado um circuito termo-hidráulico de uma típica máquina de café expresso [25]. Pela observação do circuito, é possível verificar que a máquina possibilita a obtenção de vapor e água quente, para além da obtenção de cafés no grupo. No entanto, não é possível identificar o tipo de máquina, pois não é referido se o grupo é com manípulo (máquina tradicional) ou para cápsulas.

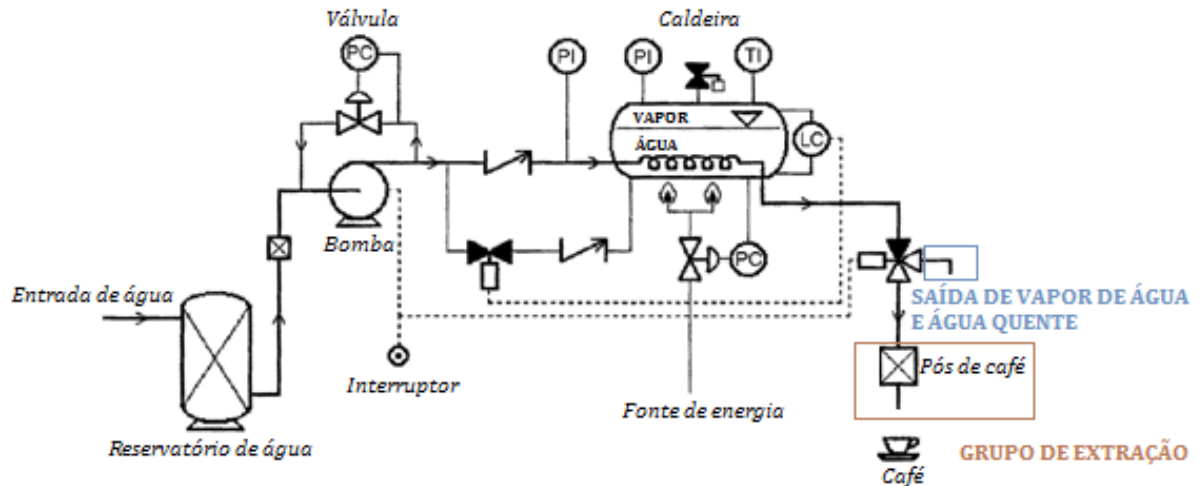


Figura 13 Circuito termo-hidráulico de uma máquina de café expresso típica – adaptado de [25].

Neste circuito, a água existente num reservatório é bombeada a elevada pressão e forçada a atravessar uma unidade de aquecimento, neste caso, uma caldeira. Uma vez atingida uma determinada temperatura nesta unidade, uma quantidade de água pré-determinada é injetada no café, onde se dá a mistura da mesma com o pó de café (percolação). O resultado dessa mistura (a bebida de café) escorre para uma chávena colocada por baixo do grupo de extração. Um grupo de extração é um ponto da máquina onde se pode preparar o café, pelo que é necessário mantê-lo quente (88 a 92°C). Neste caso específico, a obtenção de água quente e de vapor de água é obtida na mesma unidade de aquecimento em que é obtida a água para a percolação (Figura 13). No entanto, podem existir unidades de aquecimento distintas para cada uma destas funções.

Nesta secção do capítulo, pretende-se dar a conhecer os principais componentes das máquinas de café e as suas principais funções. A relação entre componentes e a especificação detalhada das suas características técnicas só é apresentada no capítulo 3, aquando do estudo da máquina real utilizada para o desenvolvimento do projeto, pois variam de equipamento em equipamento.

2.4.1 Unidades de aquecimento

O sistema de aquecimento das máquinas de café é determinante para definir a qualidade do café obtido. É este sistema o responsável por aquecer os grupos de extração, por fornecer vapor e água quente e por fornecer água à temperatura desejável para a percolação. Existem várias unidades de aquecimento que, de forma isolada ou combinada, permitem obter, com maior ou menor satisfação, estes objetivos. As unidades de aquecimento mais comuns são as caldeiras, os permutadores de calor e os termoblocos.

2.4.1.1 Caldeiras e permutadores de calor

As caldeiras são, normalmente, construídas em alumínio, latão ou aço inoxidável e podem surgir, nas máquinas de café, de um modo isolado (Figura 14) ou em combinação com outras caldeiras (Figura 15).

Tal como esquematizado na Figura 14, a água vinda do reservatório é bombeada para o interior da caldeira, enchendo-a até um determinado nível (normalmente mais de metade), suficiente para garantir que a resistência no interior da caldeira fique mergulhada. No caso

particular representado, a água é aquecida até à temperatura ideal para a extração do café. Se for necessária a produção de vapor quente, a resistência elétrica aquece a água para uma temperatura superior, gerando-se pressão no interior da caldeira. Naturalmente, o vapor de água fica na zona superior da caldeira e água quente fica na zona inferior. Através da interface, o utilizador define se quer obter café ou vapor de água. Caso deseje vapor, este sai da caldeira em direção à saída. Caso seja pedido um café, a água quente segue em direção ao grupo de extração, onde se dá a percolação.

A caldeira está associada a um conjunto de elementos de sensorização que enviam informações relacionadas com as temperaturas e as pressões verificadas no seu interior e com o nível de água existente. Em função destas informações, a placa eletrónica envia sinais elétricos à resistência e à bomba da caldeira, para controlar, respetivamente, o aquecimento e o enchimento da mesma. No caso do controlo do aquecimento, também existe um conjunto de válvulas mecânicas que garantem a segurança do sistema [43].

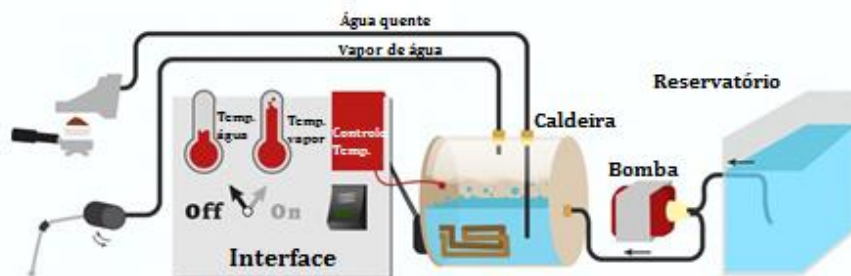


Figura 14 Representação esquemática do funcionamento de um sistema de aquecimento constituído por uma única caldeira – adaptado de [44].

Para utilizadores que não necessitem de vapor de água, sendo-lhes suficiente a obtenção de água quente para produzir o café, o sistema de aquecimento com uma caldeira isolada é ideal, pois permitir a obtenção de expressos de grande qualidade, devido à grande estabilidade da temperatura da água que é conseguida, para além de que também é possível armazenar grandes quantidades de água quente por longos períodos [45].

O inconveniente de utilizar somente uma caldeira, para a produção simultânea de café e de vapor, prende-se com o facto de o vapor, por norma, se esgotar rapidamente. Por isso, caso seja requerida uma grande quantidade de vapor, o sistema vai introduzir mais água (fria) na caldeira, para repor os níveis de água, reduzindo consideravelmente a temperatura geral da mesma. Por esta razão, existe um certo tempo de espera para permitir que a água atinja, de novo, as temperaturas indicadas. Na tentativa de reduzir estes intervalos de inatividade, a água das caldeiras é, geralmente, mantida entre um valor mínimo e máximo de temperatura, mas esta solução resulta em elevados gastos energéticos.

Em determinados casos, existe, também, um sistema de aquecimento com duas caldeiras, tal como sugere a Figura 15.

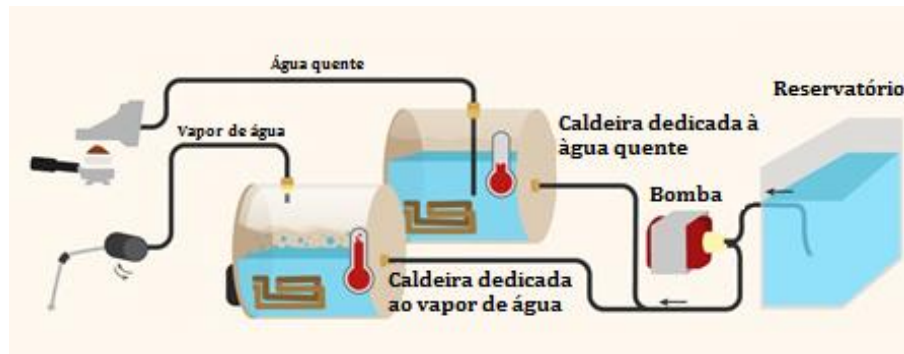


Figura 15 Representação esquemática do funcionamento de um sistema de aquecimento constituído por duas caldeiras – adaptado de [44].

Neste sistema, consegue-se ter a produção imediata de água quente, para o café, e de vapor, sem espera, pois cada uma das caldeiras funciona sempre a uma única temperatura, sendo possível ter duas temperaturas de água distintas, em simultâneo, numa só máquina. No entanto, é necessário um maior volume de máquina para ser possível alojar duas caldeiras no seu interior. Se a esta for para ambiente profissional, onde não existe uma tão grande sensibilidade para a questão do tamanho, este sistema poderá ser uma solução, mas, se for para uso doméstico, este fator pode ser bastante desfavorável, pois a compactação é preferível. Para além disso, como cada caldeira está associada a um conjunto considerável de elementos, o custo da máquina aumenta bastante [46].

Uma outra alternativa contempla uma caldeira e um permutador de calor. Neste sistema, o permutador de calor está localizado na seção principal da caldeira, num tubo separado que atravessa a caldeira principal (Figura 16).

A água na caldeira principal é utilizada para a geração de vapor quente, pelo que se encontra a uma temperatura muito superior à necessária para a água quente utilizada no café. Quando é requerido um café, a água do reservatório é bombeada para o interior permutador, aquecendo à medida que atravessa a caldeira, pela troca de calor com a água a elevada temperatura, existente na caldeira principal. Este sistema, embora mais compacto do que os sistema de duas caldeiras, possuiu uma maior probabilidade de originar flutuações na temperatura da água para a percolação [45][46].

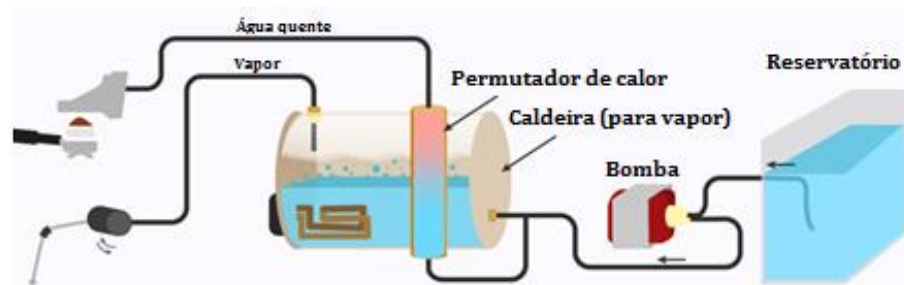


Figura 16 Representação esquemática do funcionamento de um sistema de aquecimento constituído por uma caldeira e um permutador de calor – adaptado de [44].

2.4.1.2 Termoblocos

Um termobloco (ou *thermoblock*) é um bloco de metal constituído por uma resistência elétrica e por um conjunto canais no seu interior que permitem a passagem da água. Exemplos de alguns termoblocos encontram-se nas Figura 17 a) a d).

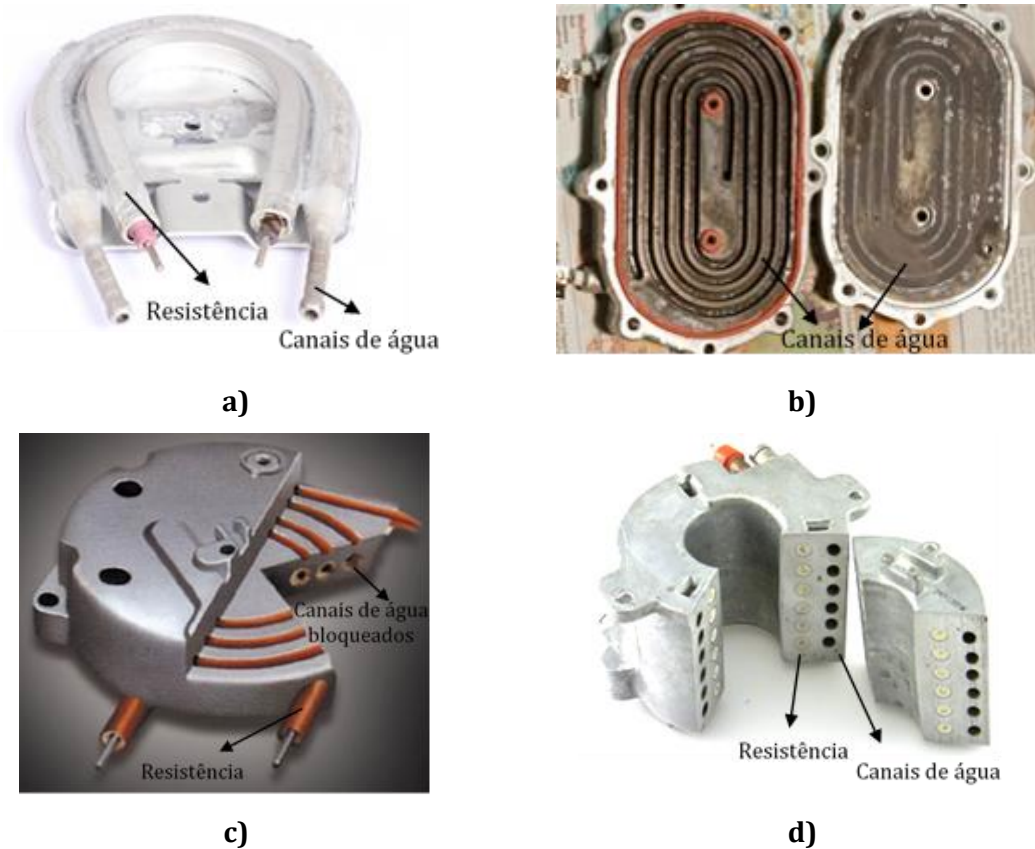


Figura 17 Vários tipos de termoblocos [45] e [47]; a) termobloco de liga de alumínio com resistência elétrica exterior; b) duas metades de um termobloco que se aparafusam, sendo visíveis os canais de água e alguns vestígios de corrosão. Neste caso a resistência encontra-se do lado exterior de uma das metades; c) termobloco em forma de disco com resistência embutida, sendo visível que os canais de água estão parcialmente bloqueados com impurezas; d) termobloco com resistência embutida no interior, com um formato exterior diferente do apresentado em c).

O sistema de aquecimento com recurso a um termobloco encontra-se esquematizado na Figura 18. Nos termoblocos, a resistência aquece o bloco de metal até uma determinada temperatura. À medida que a água passa no interior dos canais do bloco, vai ocorrendo a troca de calor entre o bloco quente e a água fria, sendo esperado que, à saída do termobloco, a água tenha atingido a temperatura adequada para o café. A quantidade de água que atravessa esta unidade de aquecimento é apenas a necessária para a produção do café. Caso seja necessária a produção de vapor, a resistência elétrica aquece o bloco até temperaturas superiores, adequadas à produção do vapor quente, e a bomba fornece pequenos jatos de água para o interior do termobloco que, à saída do mesmo, devem sair na forma de vapor. Normalmente, os termoblocos dispõem de um conjunto de sensores para evitar o sobreaquecimento do mesmo [43].

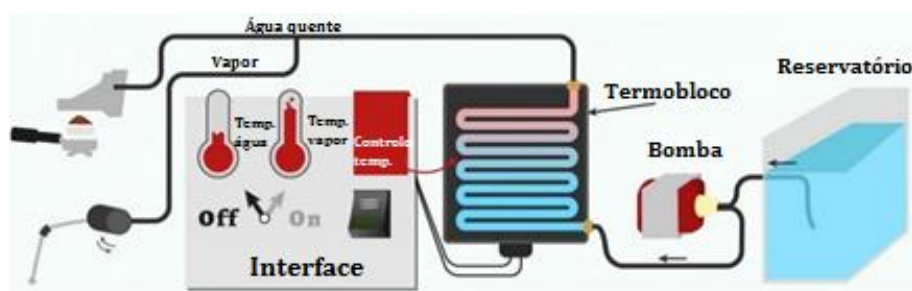


Figura 18 Representação esquemática do funcionamento de um sistema de aquecimento constituído por um termobloco – adaptado de [44].

Não há reserva de água quente ou de vapor nestas unidades, pelo que a água só entra no termobloco, para ser aquecida, no momento em que é requerida pelo utilizador e na quantidade exata necessária. A principal vantagem do uso de termoblocos prende-se com o facto de estes atingirem, mais rapidamente, as temperaturas necessárias, possibilitando uma preparação quase imediata de água e/ou vapor. Assim, podem ser desligados quando não são precisos, ao passo que as caldeiras são constantemente mantidas entre duas temperaturas, tendo um gasto energético maior e uma maior quantidade de água para aquecer. De salientar, ainda, que o seu reduzido tamanho, em comparação com as caldeiras, possibilita a conceção de máquinas mais compactas.

Contudo, dependendo do tipo de termobloco, podem verificar-se flutuações térmicas significativas no mesmo, geralmente, devido à sua reduzida capacidade térmica mássica e ao reduzido volume de água que atravessa o bloco, dificultando a obtenção de um expresso de qualidade e originando vapor húmido indesejável.

Na Figura 17 b) é expectável uma dissipação maior de calor, devido à necessidade de aparafusar as duas metades do termobloco, em comparação com os tipos da Figura 17 c) ou da Figura 17 d). Uma outra desvantagem registada em alguns termoblocos prende-se com a progressiva degradação do material utilizado na sua produção, devido a fenómenos de corrosão galvânica, que pode levar à existência de partículas de metal na bebida ou, até mesmo, ao bloqueio dos canais de circulação da água, normalmente de tamanho reduzido (Figura 17 c). Por vezes, a própria água, se não estiver devidamente filtrada e livre de impurezas, pode ser o suficiente para provocar o bloqueio dos canais. Por fim, enquanto as caldeiras tradicionais são teoricamente projetadas para funcionarem durante um período indefinido de tempo, com mínima manutenção, os termoblocos são trocados, normalmente, entre cada 3 a 5 anos.

Assim, as formas, os tamanhos e o material em que são produzidos, determinam fortemente a qualidade, a eficiência e a longevidade dos termoblocos, mas, de um modo geral, o seu custo de produção relativamente reduzido, aliado à sua natureza compacta, possibilitam a obtenção de cafés com uma boa relação qualidade/custo, motivo pelo qual têm vindo a ser, cada vez mais, a opção de várias marcas internacionais [45].

2.4.2 Bombas

As bombas de palhetas rotativas (*rotary vane pump*) e as bombas vibratórias são os tipos de bombas mais utilizados nas máquinas de café (Figura 19). Em seguida, é apresentado o princípio de funcionamento de cada uma.



Figura 19 Bomba rotativa de palhetas com o motor acoplado e bomba vibratória, lado a lado – adaptado de [48].

Tal como indicado na Figura 20, as bombas de palhetas rotativas funcionam pela rotação de um veio no interior de um anel excêntrico. Entre o anel e o veio existe uma folga (câmara de água), somente num dos lados, que é preenchida com água. À medida que o veio roda no interior do anel excêntrico, a câmara de água vai diminuindo, forçando a saída da água. De modo a evitar oscilações na pressão, a bomba é desenhada de forma que a entrada de água na câmara ocorra antes de se ter terminado, por completo, a expulsão da água anterior. Assim, a máquina de café consegue trabalhar a uma pressão praticamente constante. Uma característica interessante destas bombas, está relacionada com o facto de o volume debitado variar pouco com a pressão, sendo praticamente constante (para pressões muito elevadas geralmente existe uma quebra ligeira no volume), o que é conseguido devido ao modo como está construída.

Estas bombas também podem trazer uma válvula limitadora de pressão (em *bypass*) incorporada para proteger o circuito contra a possibilidade de ocorrência de picos pressões, para além dos definidos. Sempre que a pressão na exaustão for superior à suposta, a válvula abre e o excedente de água entra, novamente, na zona de admissão da bomba. Por esta razão, não é apropriado utilizar esta válvula como reguladora do fluxo do circuito, pois pode levar a que a água esteja permanentemente a circular no interior da bomba, provocando o seu sobreaquecimento. Também é importante referir que as bombas de palhetas rotativas estão sempre acopladas a um motor [49][50].

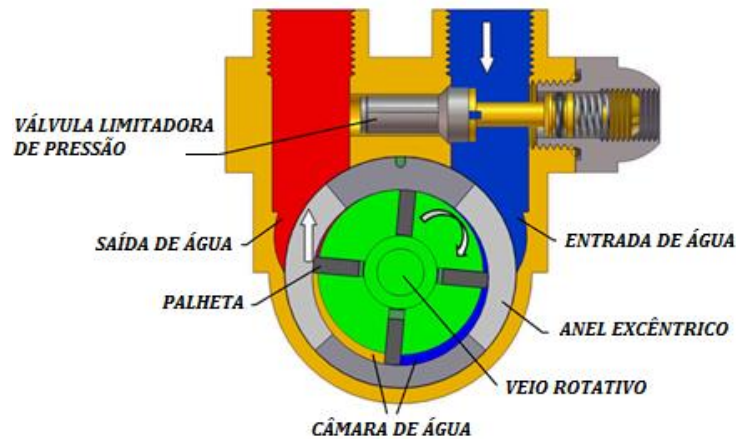


Figura 20 Vista em corte do interior da bomba de palhetas rotativa, com os seus respetivos componentes – adaptado de [49].

As bombas de vibração apresentam um princípio de funcionamento diferente. Estas possuem um pequeno pistão, uma mola de retorno e um eletroímã, como esquematizado na Figura 21. Quando a corrente elétrica aplicada atravessa a bobina do eletroímã, o campo magnético gerado move o pistão na direção da entrada da bomba, permitindo que a água consiga fluir até a câmara de pressão. Como a corrente passa numa só direção, a dado momento do ciclo, a corrente elétrica deixa de passar na bobina. Assim, a mola de retorno do pistão empurra o pistão na direção da zona de saída da bomba e a esfera veda a frente do pistão, forçando a passagem da água da câmara pela válvula unidirecional, em direção à saída. Compreende-se, então, que estas bombas apresentem oscilações de pressão à saída, pois a água é bombeada em pequenos “pulsos” a elevada frequência, correspondentes a cada ciclo do movimento do pistão, o que também resulta num elevado ruído aquando do seu funcionamento [51]. Ao contrário das bombas apresentadas anteriormente, as bombas vibratórias não contemplam uma válvula limitadora de pressão incorporada, logo, para obter os caudais necessários e, simultaneamente, se tentar estabilizar a pressão na máquina, é necessária uma válvula adicional para acrescentar a jusante da bomba.

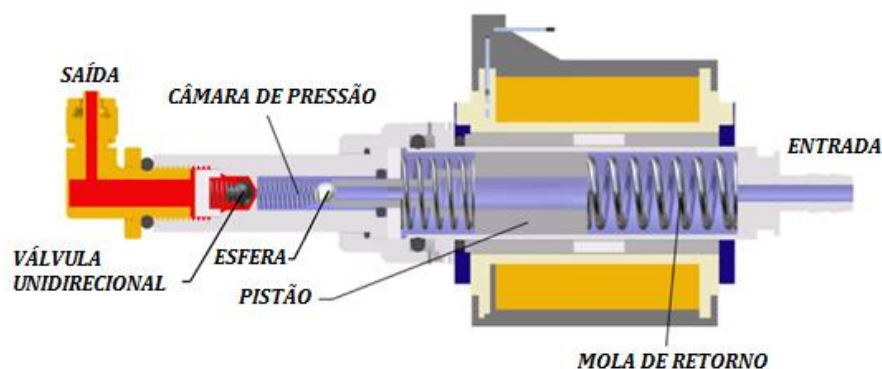


Figura 21 Vista em corte da bomba de vibração, com os seus constituintes, na posição de repouso – adaptado de [51].

Posto isto é possível retirar algumas conclusões em relação às bombas apresentadas. Devido ao seu princípio de funcionamento, as bombas de palhetas rotativas apresentam pressões constantes à saída, por oposição às bombas vibratórias que funcionam em ciclos curtos de elevada frequência. Esta característica particular do princípio de funcionamento das bombas vibratórias, leva a que sejam bastante ruidosas, por comparação com as primeiras, para além de originar, igualmente, um maior desgaste dos seus constituintes.

Um outro aspeto diferenciador está relacionado com o tipo de constituintes de cada bomba, em particular, o seu modo de fabrico e os seus materiais, o que, aliado aos aspetos referidos anteriormente, leva a que as bombas rotativas apresentem um custo consideravelmente mais elevado do que as bombas de vibração. Enquanto a bomba de vibração apresenta uma constituição mais simples, essencialmente com componentes em termoplástico, duas molas e um pequeno pistão em aço, a bomba de palhetas rotativas apresenta uma grande variedade de constituintes, como um veio em aço inoxidável, anilhas, rolamentos, palhetas, entre outros, para além de possuir um corpo obtido por fundição [50]. Existem, ainda, alguns estudos, como o realizado por [52], que alertam para a existência de problemas de corrosão galvânica nos componentes das bombas de vibração, nomeadamente, entre a interface pistão-mola. Assim, por norma, o custo de uma bomba de palhetas rotativas está compreendido entre os 70€ e os 90€ (sem motor), sendo que o conjunto ronda os 120€ e o de uma bomba vibratória ronda os 30€.

Por fim, a opção por uma ou outra bomba provém da consideração de todos estes fatores, sendo uma opção última do utilizador. Este deve decidir em função das suas necessidades, no que diz respeito à pressão, e das suas restrições em relação ao volume da máquina (o conjunto motor e bomba rotativa é bastante maior do que a bomba de vibração, como se observa na Figura 19) e ao custo das bombas.

2.4.3 Válvulas e elementos de sensorização

Para além das bombas e das unidades de aquecimento, existe, ainda, um conjunto de elementos de sensorização, como sondas, termostatos e pressostatos que, de forma generalizada, garantem o correto funcionamento e a segurança do sistema. Normalmente, surgem associados às unidades de aquecimento de modo a permitir a medição de diversos parâmetros de funcionamento.

As válvulas, em particular, surgem em vários tipos e destinadas a diferentes funções. Podem estar associadas à segurança e proteção de componentes e sistemas ou, então, podem ser responsáveis por encaminhar a água pelos canais devidos. Neste último caso, destacam-se as electroválvulas de três vias, sincronizadas com o interruptor de energia da bomba, que permitem a despressurização da câmara de extração no final da percolação, aliviando a pressão no porta-filtros, de modo a possibilitar a tiragem consecutiva de cafés. Esta ação de despressurização torna-se necessária porque, uma vez tirado o café e desligada a bomba, a água não é capaz de filtrar o café, entretanto hidratado, permanecendo sob pressão no grupo.

A identificação mais detalhada destes componentes é abordada no capítulo 3, aquando do estudo da máquina real disponibilizada, que serviu de base para o desenvolvimento da dissertação.

2.4.4 Unidade de controlo

A unidade de controlo é responsável pelo controlo e automatismo da máquina, gerindo a sequência de “eventos” do circuito termo-hidráulico das máquinas. Geralmente, nas máquinas mais atuais, existe uma placa eletrónica como a representada na Figura 22, que contempla todo o circuito de lógica.



Figura 22 Placa eletrónica da *Ascaso*® [53].

De um modo simplista, as placas eletrónicas recebem os sinais elétricos enviados pelas opções definidas pelos utilizadores, nos interruptores existentes na interface, e as informações recolhidas pelos diversos elementos de sensorização, para controlar os componentes eletromecânicos da máquina. Os elementos eletromecânicos podem ser electroválvulas, bombas ou unidades de aquecimento, cuja atividade está dependente dos sinais elétricos recebidos pela placa e cuja função tem um impacto direto no circuito termo-hidráulico da máquina. Os interruptores representados podem ser botoneiras de atuação mecânica ou ecrãs *touch* (Figura 23) [54].

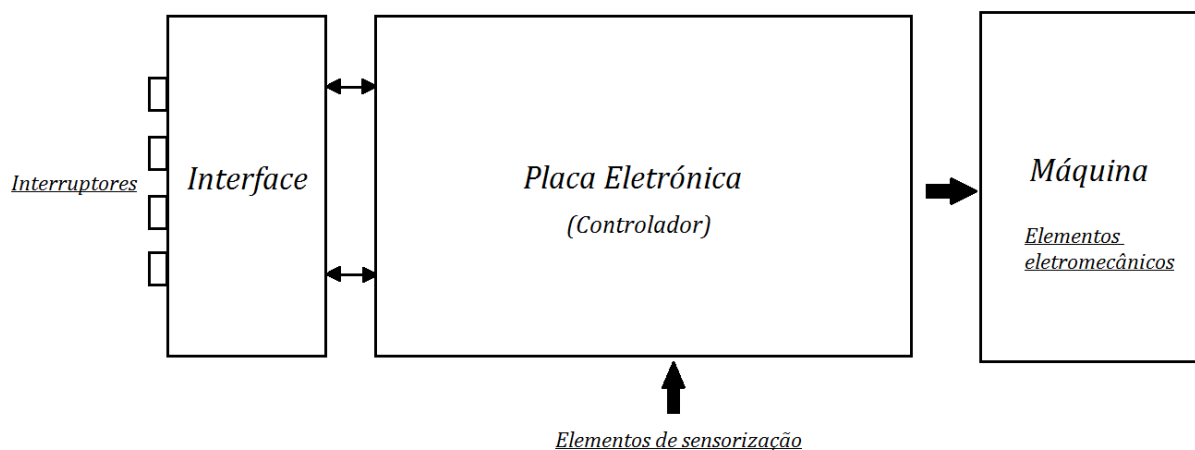


Figura 23 Representação simplista da relação geral entre os diversos componentes principais de uma máquina de café - adaptado de [54].

2.5 Sustentabilidade ambiental das máquinas em unidoses

Na secção 2.3.2 referiu-se que o mercado das máquinas de café é dominado pelas máquinas em unidoses, realçando-se a introdução crescente deste tipo de equipamentos no mercado profissional português.

No sentido de perceber a importância em abordar a temática da sustentabilidade ambiental, aplicada às máquinas de café, considere-se a Figura 24, relativa a uma notícia publicada por Vaidehi Shah [55], no âmbito de “*Waste management*” (“Gestão de resíduos”). Esta faz referência a um estudo realizado internamente pela *Nespresso*®, em 2012, no qual a empresa revela que, aquando da produção de um copo de café *Nespresso*®, as fases de uso da sua máquina e de produção e reciclagem das suas cápsulas, contribuem com cerca de 65.4% da sua pegada de carbono total.

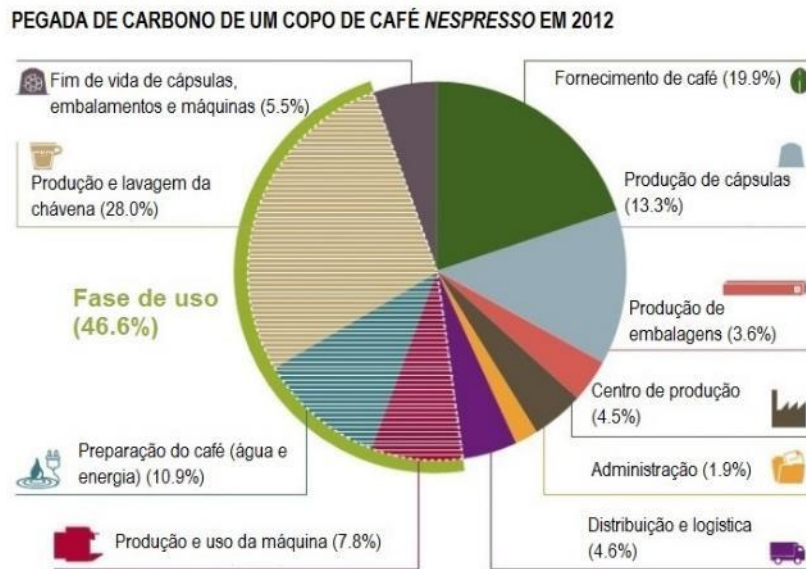


Figura 24 Decomposição da pegada de carbono total da produção de um café *Nespresso*, pelas diversas fases da cadeia - adaptado de [55].

Por esta razão, faz-se uma abordagem aos principais consumos energéticos das máquinas e às cápsulas, identificando-se os principais problemas e expondo-se algumas das soluções utilizadas.

2.5.1 Consumos energéticos

As máquinas de café contribuem com gastos energéticos consideráveis, sobretudo no “modo pronto” (*ready mode*), em que as unidades de aquecimento têm de aquecer a água e mantê-la a uma temperatura elevada e constante, por longos períodos de tempo. Devido à elevada potência de funcionamento destas unidades (entre 1000 a 1500 W), as funções de “modo pronto” consomem até 150kWh por ano, dependendo dos hábitos do utilizador em desligar completamente a máquina, ou não. Nunca desligar a máquina, pode duplicar este valor. Note-se que 150kWh excede a energia anual consumida por um pequeno frigorífico [30].

Outros grandes consumidores de energia na máquina de café são as funções de *standby*, pois mesmo quando a máquina não está em uso, se não estiver completamente desligada e sem ligação à corrente, continua a consumir energia. Já o conjunto de motores, bombas e electroválvulas, embora possam ter potências de funcionamento elevadas, geralmente, só trabalham durante alguns segundos ou minutos, tendo um consumo relativamente reduzido [30].

A eletricidade consumida pelas máquinas de café e o seu potencial para ser poupada, são bastante significativos. Se, nos próximos anos, 100milhões de máquinas de café na Europa forem substituídas por modelos eficientes, todos os anos, mais de 10000 milhões de kWh (ou cerca de 2000 milhões de euros em custos de eletricidade) podem ser poupados, de acordo com [30]. Os parâmetros-chave que melhoram consideravelmente a eficiência energética de uma máquina de café são:

- a função para **desligar automaticamente (*auto-power-down*)**: esta função foi uma das primeiras a ser implementadas e é uma forma simples de reduzir os altos consumos do “modo pronto” (*ready mode*), que mantêm a água sempre quente. No entanto, o tempo que a máquina leva a transitar entre o modo pronto e o modo

standby ou completamente desligado, também é importante, devendo ser o mais curto possível;

- o **isolamento das unidades de aquecimento**: as perdas térmicas são consideravelmente minimizadas pelo isolamento dos termoblocos e das caldeiras, ajudando a reduzir a quantidade de energia necessária para manter a água quente;
- a **função de poupança energética (“energy saving mode” ou “ecomode”)**: esta função pode ser programada no menu ou ser uma definição de fábrica. Este modo baixa a temperatura da unidade de aquecimento ao fim de um certo período de inatividade, da temperatura *standard*, para uma temperatura ligeiramente inferior. Assim, a máquina não está no *ready mode*, altamente consumidor de energia, mas requer alguma energia e tempo para reaquecer até à temperatura *standard*. No entanto, este tempo é bastante mais reduzido do que o “modo frio”, quando a máquina está em *standby* ou completamente desligada. A temperatura do *ecomode* deve ser definida tendo em consideração o ciclo de atividade da máquina e, se bem escolhida, permite alcançar grandes poupanças energéticas;
- a utilização unidades de aquecimento com **menor capacidade térmica mássica**: a capacidade térmica mássica (J/K) traduz a quantidade de energia que é necessária fornecer para variar a temperatura em um grau. Quanto menor for, menor é a energia necessária para aquecer;
- **zero standby consumption**: reduzir ou anular o consumo em *standby*, desligando definitivamente a máquina;
- a **redução do consumo de energia em processos auxiliares**: reduzir a temperatura e o volume de água utilizado em processos automáticos de limpeza e descalcificação [30].

2.5.2 As cápsulas de café

As cápsulas para café são pequenos recipientes que contêm café moído, utilizados em máquinas próprias e que permitem a preparação rápida do café. As categorias de materiais mais utilizados na produção das cápsulas são o papel, o plástico (termoplásticos) e o metal. De um modo geral, têm de assegurar a selagem da cápsula, o seu correto funcionamento na máquina e preservar as propriedades do café.

O papel não protege completamente o café da exposição à radiação solar e do contacto com o ar, mas é muito leve, reciclável, barato e fácil de fabricar. Os materiais plásticos, regra geral, são capazes de suportar temperaturas entre 55 e 150°C. Para resistirem a temperaturas mais elevadas, as cápsulas em plástico têm de incorporar materiais resistentes a altas temperaturas, sendo moldadas, enchidas e revestidas por camadas permeáveis à água. O material mais utilizado nesta categoria é o polipropileno. As cápsulas constituídas por material metálico são fabricadas mais facilmente do que as cápsulas em plástico, sendo muito pouco espessas, mas, também, difíceis de combinar com o material de filtragem adequado, podendo ter o inconveniente de reagir com o café moído, alterando as suas propriedades e, conseqüentemente, o seu aroma. Um dos materiais mais utilizados no fabrico de cápsulas para café é o alumínio, pela capacidade em proteger o café da interação com o oxigénio [56].

O grande inconveniente das cápsulas, prende-se com o seu fim de vida. O consumo crescente de café, sob a forma de cápsulas, levanta problemas ecológicos sérios. Se cada pessoa beber 2 cafés por dia, em 350 dias por ano, é responsável por 700 cápsulas, o que pode chegar a 700 g de alumínio, 5.7 kg de plástico ou 4.2 kg de papel. Por norma, as cápsulas, para além do corpo da

cápsula em plástico ou alumínio, do filtro e do café no seu interior, ainda contêm uma membrana exterior, também em plástico, e um conjunto de outros elementos residuais que ajudam na selagem das cápsulas. Dada a grande complexidade e mistura de materiais utilizados na sua produção, incluído a borra de café, a reciclagem das cápsulas é dificultada [57].

Por isso, grande parte das cápsulas são encaminhadas pelos consumidores para os lixos domésticos indiferenciados, o que torna muito incerta e improvável a reciclagem, tanto dos materiais, como da borra de café. Dada a inexistência de sistemas eficientes de separação dos lixos domésticos, a reciclagem de cápsulas também acaba por ser inconveniente, pois seria necessário que o utilizador separasse cada um dos constituintes da cápsula para reciclagem, perdendo-se todo o sentido de comodidade associado às mesmas [58].

O risco ambiental, associado às cápsulas é tão grave que, algumas cidades, chegam a proibir a sua utilização em edifícios municipais. Uma notícia publicada em 2016 faz referência a um boicote realizado pela câmara de Hamburgo, na Alemanha, à compra de todos os produtos de preparação de bebidas quentes, em que sejam utilizadas embalagens em porções, como é o caso das cápsulas. Esta medida faz parte de um movimento ambiental de maiores dimensões, que visa reduzir os desperdícios e o uso desnecessário de recursos. De acordo com Jens Kerstan, senador do ambiente de Hamburgo, à data da notícia, o objetivo é ajudar a garantir que os produtos prejudiciais ao meio ambiente sejam comprados com menor frequência [59].

São várias as alternativas existentes à reciclagem, quer pelo aproveitamento dos resíduos, incluindo as borras de café, que podem e devem ser transformados em novos produtos, quer pela reutilização das cápsulas, que pode contribuir para a redução direta de resíduos. No entanto, qualquer forma de consumo de café, vem sempre com uma embalagem associada.

A tendência, todavia, está na utilização de materiais biodegradáveis. Existem, atualmente, vários materiais biodegradáveis certificados, aptos à aplicação em indústria alimentar. É necessário testá-los do ponto de vista da selagem, garantir o seu funcionamento adequado nas máquinas e garantir a preservação das propriedades do café. A única limitação à utilização de materiais biodegradáveis, incluindo a borra de café, é o posterior tratamento por compostagem, só garantido com a recolha seletiva por iniciativa da própria marca. A *BICAFÉ*® tem apostado no desenvolvimento de cápsulas biodegradáveis e este é, também, um dos objetivos do seu projeto.

2.6 Tendências e oportunidades futuras

A indústria do café, no seu geral, está em crescimento (secção 2.1). A sua extensa cadeia de logística (secção 2.2) com inúmeros intervenientes, tornam-na em algo complexo, com contributos significativos para a economia global. Assim, existe um grande conjunto de oportunidades no mercado que podem ser aproveitadas, desde que ocorra a identificação correta e antecipada dos problemas e das necessidades existentes.

Do ponto de vista dos países importadores, como Portugal, as grandes oportunidades de mercado encontram-se no setor da torrefação e do desenvolvimento e venda de novas máquinas de café. Numa sociedade cada vez mais “comodista” e “ocupada”, mas, simultaneamente, mais informada e criteriosa nas escolhas que faz, com fácil acesso a uma extensa gama de produtos, a rapidez, a qualidade, a ecologia, o *design* e a ética, aliados ao custo final, são aspetos fundamentais no momento da escolha de um produto.

À medida que a crítica invade a categoria das unidoses devido ao seu impacto ambiental, as empresas têm encontrado soluções inovadoras para contornar o problema, procurando a sustentabilidade dos seus produtos e fazendo disso uma vantagem competitiva. Estas soluções

passam pela introdução de cápsulas biodegradáveis, que cumprem normas internacionais, e pela garantia de rótulos éticos, como os do comércio justo ou da certificação orgânica.

Também o automatismo e a inteligência aplicados às máquinas são importantes fatores diferenciadores das mesmas, pois está-se perante uma sociedade com padrões de consumo baseados nas tecnologias eletrônicas. Estes representam, não só, uma interatividade crescente com o utilizador, mas, também, um controlo mais preciso dos parâmetros funcionais da mesma, sendo um forte auxílio na obtenção de cafés de qualidade, com maior eficiência energética e no menor tempo possível.

É neste contexto de oportunidades, que surge o projeto da *BICAFÉ®*, no qual se insere a presente dissertação, cujo objetivo final é o desenvolvimento de uma máquina de café em unidoses (neste caso, cápsulas), mais ecológica e “inteligente”, para o mercado HORECA português. O projeto pretende, também, desenvolver cápsulas biodegradáveis. A estas componentes ambiental e tecnológica, acrescenta-se, ainda, a tentativa de produzir uma máquina com o máximo de incorporação nacional.

3 Arquitetura geral da máquina dupla de unidoses da *BICAFÉ*®

Este capítulo dá início às atividades experimentais realizadas durante a dissertação e tem como objetivo estudar o funcionamento da máquina, pela identificação detalhada dos seus componentes (secção 3.1) e pelo levantamento do seu circuito hidráulico e o conhecimento das ligações elétricas (secção 3.2). Trata-se de um trabalho extenso, mas fundamental para o sucesso das atividades a realizar posteriormente, quer na dissertação, quer no projeto e desenvolvimento de uma nova máquina de café.

A atividade experimental realizada pode dividir-se, essencialmente, em três grandes capítulos: o capítulo 3, no qual se faz o estudo da máquina de café fornecida, o capítulo 4, no qual se analisa detalhadamente o grupo de extração desta máquina (este estudo é importante para a fase seguinte do projeto, em que se pretende desenvolver um protótipo funcional com novos componentes, fabricados em Portugal) e o capítulo 5, no qual são apresentados os trabalhos realizados para o primeiro protótipo funcional da máquina.

3.1 Identificação de componentes

A máquina em estudo é a máquina de café dupla de unidoses da *BICAFÉ*®, produzida pela *Ascaso*®. Esta possui dois módulos de extração de café (A) (Figura 25), onde se encontram os dois grupos de extração e, também, um módulo que permite a obtenção de vapor de água e água quente (B) (Figura 25). A água que circula em um dos módulos nunca se mistura com a água do outro módulo.



Figura 25 Máquina profissional *Ascaso*®, *Bar Kap* de unidoses com dois grupos – adaptado de [37]; (A) as duas saídas de café pertencentes aos módulos de extração de café; (B) saídas de vapor de água e água quente do módulo de obtenção de vapor e água.

Para a identificação dos componentes principais da máquina, optou-se por analisar, individualmente, cada um dos seus dois módulos funcionais. Nos tópicos seguintes, pretendem-se apresentar as ligações entre componentes e as suas localizações na máquina.

3.1.1 Módulo de vapor de água e água quente

O módulo de vapor de água e água quente possui um conjunto variado de elementos que não são possíveis de identificar, de modo claro, numa única imagem. Por essa razão, são apresentados, em seguida, vários planos diferentes da máquina com a finalidade de identificar todos os componentes deste módulo e as respectivas localizações.

Na Figura 26 observa-se o topo da máquina, sem a envolvente exterior e com todos os componentes montados, estando identificados, apenas, aqueles que pertencem ao módulo de produção de vapor de água e água quente. Desde logo destaca-se a existência de uma caldeira (3) que, naturalmente, surge associada a um conjunto de elementos, nomeadamente, uma sonda de nível (18), um termostato (20), um pressostato (11), uma válvula de respiro (19) e uma válvula de segurança (17), com um recolhedor de água (10). De um modo generalizado, estes elementos têm como objetivo controlar o seu funcionamento e garantir a segurança do sistema.

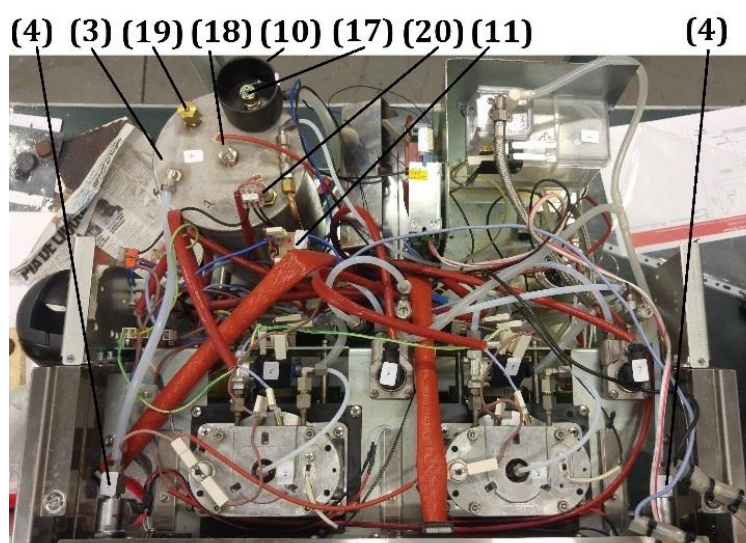


Figura 26 Vista de cima da máquina, com todos os seus componentes montados e com identificação dos componentes do módulo de vapor de água e água quente: (3) caldeira, (4) torneiras, (10) recolhedor de água, (11) pressostato, (17) válvula de segurança, (18) sonda de nível, (19) válvula de respiro e (20) termostato de segurança.

A caldeira (3) fornece água e vapor às torneiras (4), que, por sua vez, dão acesso às saídas de vapor de água (14) e de água quente (15) da Figura 27. No manómetro (13) da Figura 27 é possível ler-se a pressão que o pressostato (11) deteta no interior da caldeira.



Figura 27 Identificação dos componentes do módulo de vapor de água e água quente, na vista frontal da máquina: (13) manómetro, (14) saída de vapor de água e (15) saída de água quente.

Nas imagens anteriores só não fica identificada a bomba da caldeira (5), responsável por bombear água para o interior da caldeira. Na Figura 28 a) observam-se as ligações entre a caldeira (3) e a bomba (5), quando estas estão montadas na máquina, sendo que a bomba (5) é ampliada, na Figura 28 b), para uma melhor observação da mesma. Trata-se de uma bomba de 32W, com uma pressão máxima de funcionamento de 19bar.

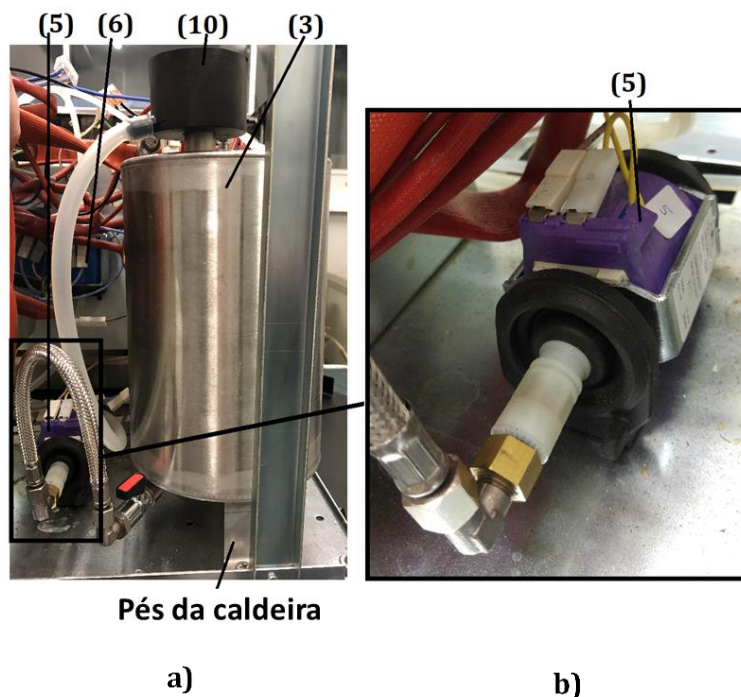


Figura 28 Apresentação da forma de montagem da caldeira (3) e da respetiva bomba (5) na máquina, com ampliação da bomba (5); a) caldeira (3) e bomba (5) montados na máquina com a identificação de outros componentes adjacentes, como as bombas dos grupos (6) e o recolhedor de água (10); b) ampliação da bomba da caldeira (5).

A posterior desmontagem da caldeira (3) permite verificar que esta possui dois pés que garantem a sua fixação à máquina através de parafusos. Destaque, ainda, nas Figura 29 a) e b) e na Figura 30, para a resistência do interior da caldeira (3), que está fixa à caldeira (3) por intermédio de três porcas M8, que roscam nos fusos existentes na sua zona inferior. Esta resistência tem uma potência de funcionamento de 1200W.



Figura 29 Vista de baixo da caldeira (3); a) vista de baixo inicial com todos os componentes montados; b) desmontagem da resistência.



Figura 30 Resistência da caldeira (3) com a presença das três porcas M8 e das três anilhas, que garantem o seu posicionamento à caldeira (3). A resistência funciona a 230V e tem uma potência de funcionamento de 1200W.

Nas Figura 31 a) e b), observa-se a sonda de nível (18) que se encontra roscada à zona superior da caldeira e que possui 120mm de comprimento.

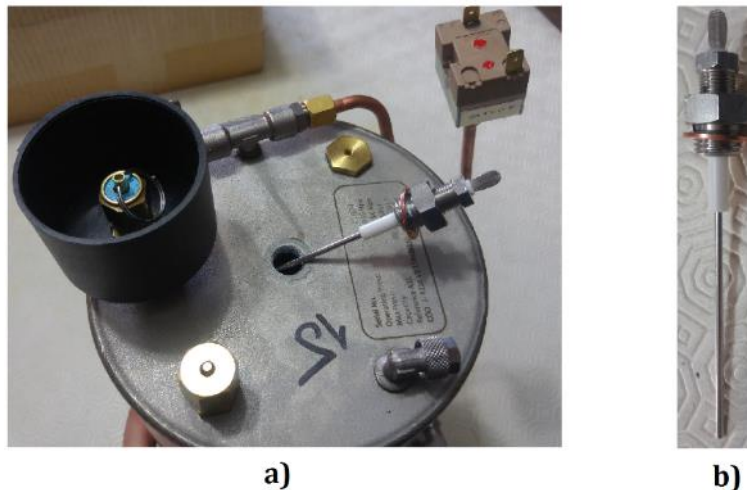


Figura 31 Caldeira (3) com destaque para a sonda de nível (18); a) vista de cima da caldeira (3) com indicação do local da sonda de nível (18); b) sonda de nível (18), com 120mm de comprimento.

Por fim, fez-se a modelação da caldeira (3) e de todos os seus componentes no *Solidworks*® [60], com as suas dimensões reais. O objetivo desta modelação é o de possuir um modelo realista e facilmente editável que sirva de auxílio, não só, para o estudo da atual caldeira, mas, também, em fases posteriores do projeto, caso se pretenda o desenvolvimento de uma nova caldeira.

Na Figura 32 observa-se a caldeira (3) com todos os seus componentes montados, após se efetuar o *rendering* da modelação. Também possui a indicação de todas as ligações da caldeira aos outros componentes.

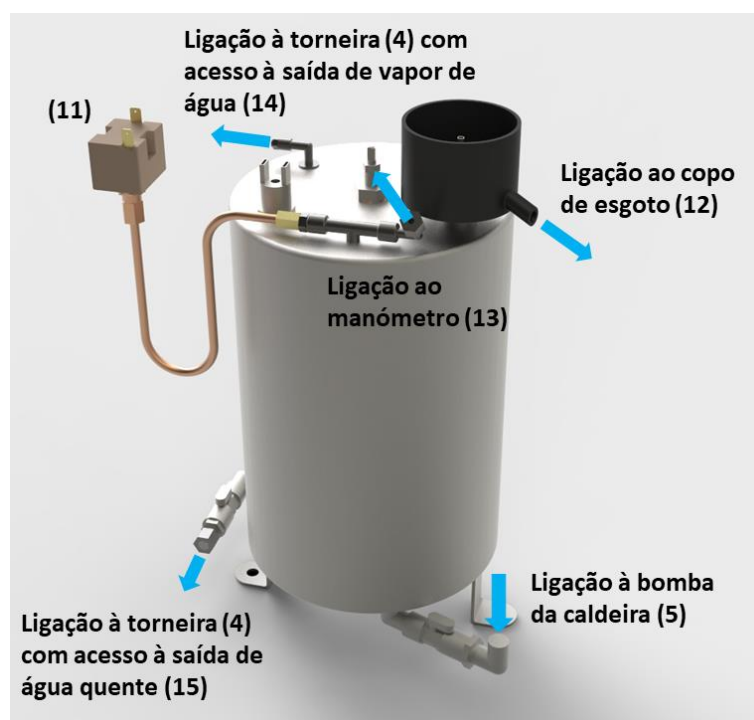


Figura 32 Modelação efetuada em *Solidworks*® [60] do conjunto da caldeira (3) com todos os seus elementos montados. Destaque para a indicação das entradas e saídas de água de todas as suas ligações.

Da imagem anterior verifica-se que a entrada de água na caldeira (3) se faz por baixo, na ligação à bomba da caldeira (5) e que o fornecimento de água quente ao sistema também é efetuado por uma saída na zona inferior da caldeira (3). O facto da entrada de água fria e da saída de água quente estarem ao mesmo nível, leva a um arrefecimento rápido da água quente armazenada no interior, pois a mistura de ambas ocorre mais facilmente. Geralmente, as caldeiras possuem um canal no seu interior que permite que a água quente circule no seu interior em direção à saída, que se encontra, por norma, na zona superior. Esta situação não se verifica na caldeira (3) em estudo, que é oca por dentro.

Existem, ainda, mais três ligações na zona superior, sendo que uma delas corresponde ao fornecimento de vapor de água e outra corresponde a uma descarga que é feita para o copo de esgoto (12) (Figura 42). Esta descarga corresponde à água proveniente de pequenas quantidades de vapor que se libertam da válvula de segurança (17) e que se acumulam no recolhedor de água (10). A última saída de água é efetuada em direção ao manómetro (13). Note-se que este está numa ligação em “T” com o pressostato (11), o que não é bem evidente na Figura 26.

De realçar, também, que a caldeira (3) tem uma capacidade de 4l que, de acordo com os técnicos da BICAFÉ®, não é suficiente para satisfazer adequadamente as necessidades regulares dos seus clientes, pois a quantidade de vapor gerada é pouca, esgotando-se rapidamente, ao fim de algumas tiragens. Sempre que o vapor se esgota, existe uma nova introdução de água fria no sistema que vai diminuir a temperatura geral da água no interior da caldeira (3), sendo necessário esperar que esta reaqueça, novamente, até atingir as temperaturas desejadas.

A espessura da caldeira (3) é de 2.3mm, o seu material é o aço inoxidável AISI316 e a sua pressão de funcionamento é de 1.5bar, sendo que a pressão máxima é de 3bar [61].

3.1.2 Módulos de extração de café

Para além do módulo de vapor de água e água quente, apresentado anteriormente, a máquina de café possui dois módulos de extração de café, iguais entre si. Estes são constituídos por um conjunto de componentes pelos quais a água passa, desde que entra na máquina, até sair no grupo de extração (32) (Figura 33 b), sem nunca se misturar com a água do módulo de vapor de água e água quente. Tal como no caso anterior, são expostos, em seguida, várias imagens com o objetivo de identificar a totalidade dos seus componentes e as suas localizações.

Na Figura 33 a) são indicadas as localizações dos dois módulos de extração e na Figura 33 b) são identificados os principais componentes de um deles.

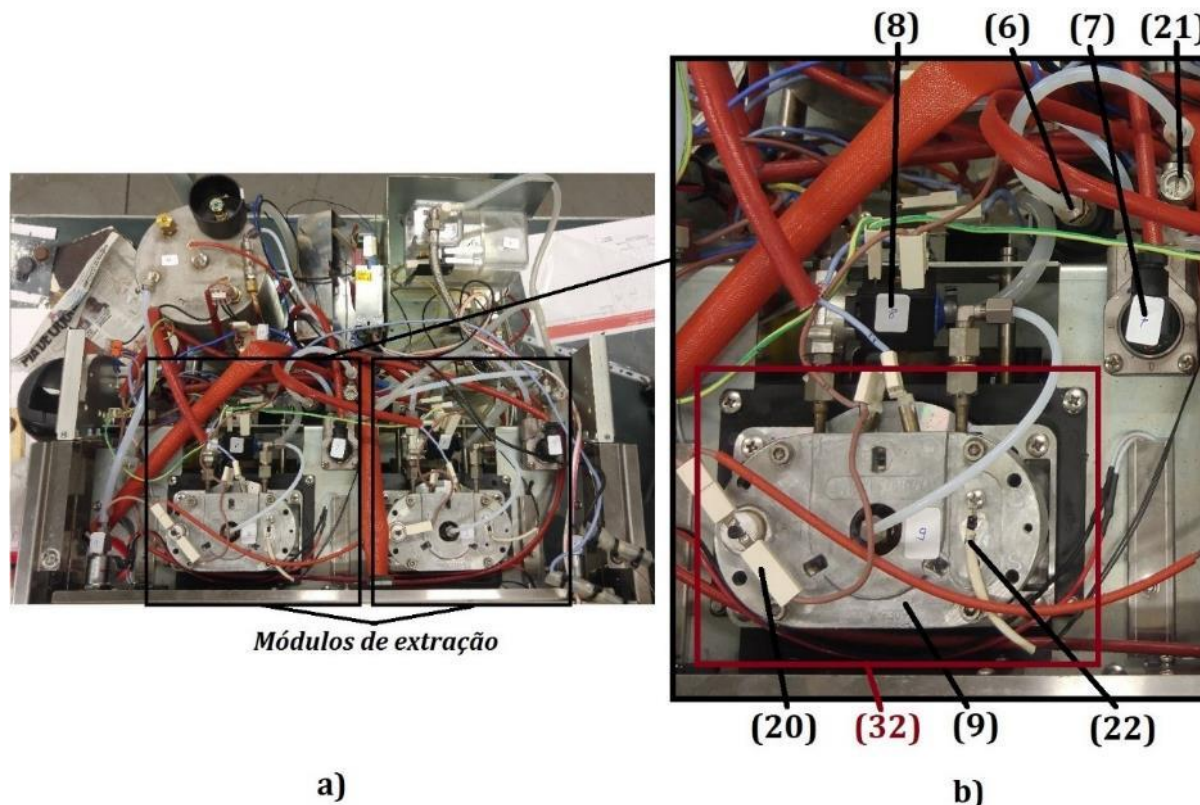


Figura 33 Indicação da localização dos módulos de extração na máquina e identificação da maioria dos seus componentes; a) vista de topo da máquina com indicação do local dos dois módulos de extração na máquina de café; b) ampliação de um dos módulos de extração para identificação de componentes: (6) bomba do grupo, (7) contador volumétrico, (8) electroválvula de três vias e duas posições, (9) termobloco, (20) termostato de segurança, (21) válvula reguladora de pressão e (22) sonda de temperatura. O grupo de extração (32) é constituído por vários componentes.

A água entra no módulo de extração através da bomba do grupo (6), passando pela válvula reguladora de pressão (21), pelo contador volumétrico (7) e pela electroválvula de três vias (8) até entrar no termobloco (9). Cada termobloco possui uma sonda de temperatura (22) e um termostato de segurança (20) para controlar o seu aquecimento. É de salientar que a sonda de temperatura (22) foi colocada, no local apresentado, pelos técnicos da BICAFÉ®. Na máquina original da *Ascaso*® a função da sonda (22) é realizada por um termostato, idêntico ao termostato de segurança (20), que se encontra na posição simétrica à atual posição do termostato (20), ou seja, numa posição mais próxima da extremidade do termobloco, em comparação com a atual posição da sonda (22).

Na Figura 34 observa-se a bomba do grupo (6) em maior detalhe. Trata-se de uma bomba de 65W, com uma pressão de funcionamento de 16bar, sendo que a pressão máxima de funcionamento é de 19bar. Note-se, também, o contador volumétrico (7) desmontado, nas Figura

35 a) a c). Este possui dois ímãs no seu interior e faz a contagem do volume de água a utilizar no café, pela contagem dos impulsos elétricos.



Figura 34 Bombas dos grupos (6).

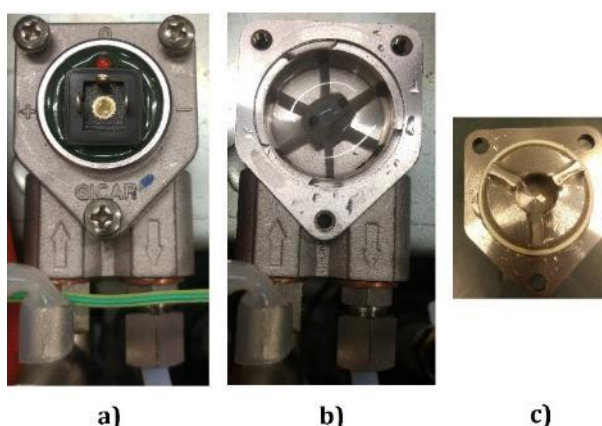


Figura 35 Contador volumétrico (7) desmontado; a) contador volumétrico (7) montado; b) interior do contador volumétrico, após remoção da tampa superior aparafusada; c) interior da tampa superior.

Nas Figura 33 b) verifica-se, ainda, a existência de um grupo de extração (32) que não deve ser confundido com o módulo de extração, ao qual este pertence. O grupo de extração (32) é um grupo de elementos que, juntamente com os outros componentes apresentados, constituem cada um dos módulos de extração da Figura 33 a). No capítulo 4 é elaborado um estudo detalhado do grupo de extração e dos seus constituintes, dada a sua importância para o funcionamento geral da máquina e para a qualidade do café final.

Na Figura 36 a) observa-se a vista frontal da máquina, com indicação da localização da gaveta (31) que recolhe as cápsulas usadas. Na Figura 36 b) são apresentadas as gavetas (16) dos grupos, onde se introduzem as cápsulas de café e a gaveta (31).



Figura 36 Vistas frontais da máquina com indicação das gavetas; a) (31) gaveta que recolhe as cápsulas usadas aberta; b) identificação das gavetas de colocação das cápsulas nos grupos (16) e da gaveta que recolhe as cápsulas usadas (31). Ambas estão fechadas.

Considere-se, agora, a Figura 37 a), onde se encontra o registo fotográfico da gaveta (16). A cápsula é introduzida no local indicado e, uma vez terminada a tiragem do café, cai pela rampa em direção à gaveta (31). Os pinos de guiamento transladam para abrir e fechar a gaveta, sendo que, quando esta está completamente fechada, as suas extremidades tocam no *micro switch* (28) (Figura 38 a). De acordo com os técnicos da BICAFÉ®, é frequente encontrar vestígios de café nestes guiamentos, o que leva a que as gavetas (16) empanquem. Devido ao excesso de força que alguns utilizadores aplicam sobre a gaveta (16), também é comum encontrar alguns pontos de fratura na mesma, pelo que se sugeria uma análise do ponto de vista estrutural, caso se pretenda desenvolver uma nova gaveta.

Na Figura 37 b) é apresentada a modelação efetuada em *Solidworks*® [60] da gaveta (16), após a realização do *rendering*.

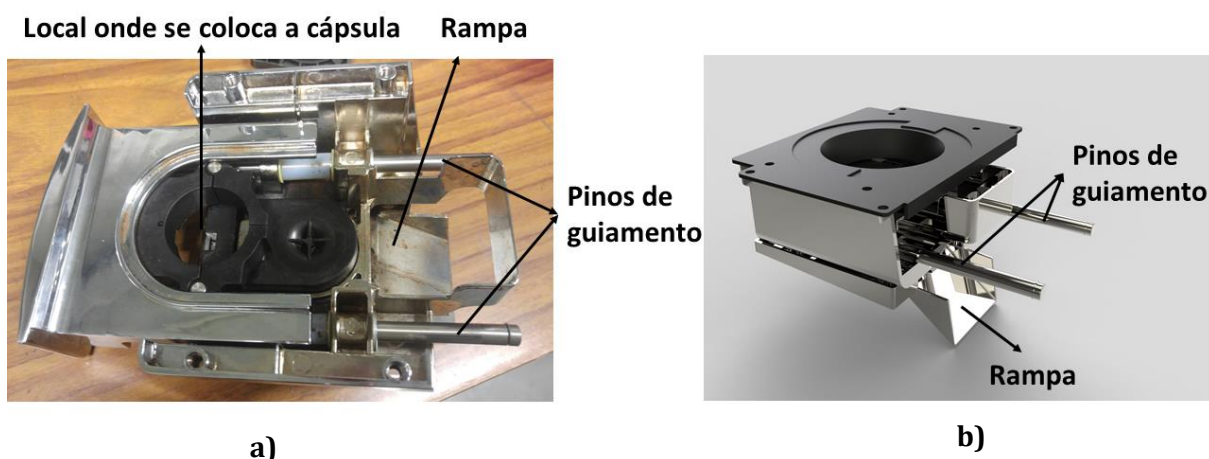


Figura 37 Gaveta do grupo (16), onde se introduzem as cápsulas; a) registo fotográfico da gaveta; b) modelação da gaveta em *Solidworks*® [60].

Por fim, na Figura 38 a), são apresentados os *micro switch* (28) que garantem o fecho das gavetas onde se introduzem as cápsulas (16) e, na Figura 38 b) é apresentado o *micro switch* (29) da gaveta que recolhe as cápsulas usadas (31), dando-se por finalizada a listagem de componentes

que constituem os módulos de extração. Estes componentes têm como objetivo garantir que as suas respetivas gavetas estão fechadas, antes de se iniciar o processo de tiragem de café.

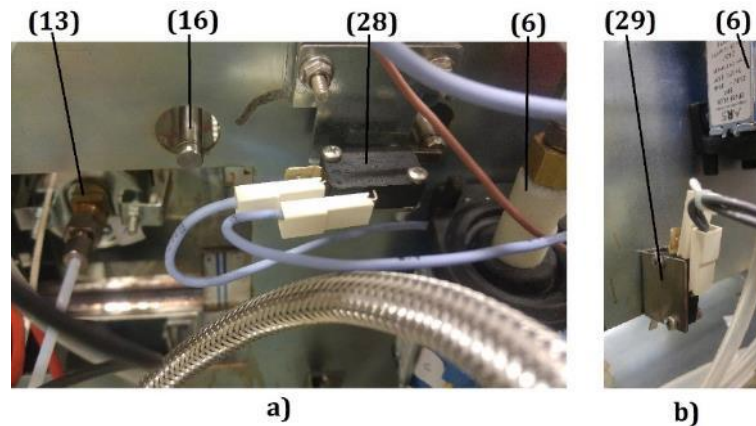


Figura 38 Interior da máquina nas proximidades das gavetas do grupo (16) e da gaveta que recolhe as cápsulas usadas (31); a) extremidade dos pinos de guiamento das gavetas (16) onde se introduzem as cápsulas, sendo visível o *micro switch* (28) de fecho da gaveta do grupo (16) e alguns componentes próximos, como a bomba do grupo (6) e a traseira do manómetro (13); b) *micro switch* (29) de fecho da gaveta que recolhe as cápsulas usadas (31) e a bomba do grupo (6), que se encontra próxima.

3.1.3 Outros componentes

Para além dos componentes diretamente associados aos módulos anteriormente apresentados existem outros que não pertencem diretamente ente a nenhum dos módulos.

Na Figura 39 b) são apresentados o depósito de água (1), com o seu *micro switch* de regulação do nível de água (30), a electroválvula de entrada de água (2) e o termostato de segurança (23), sendo que a máquina está apoiada em quatro pés reguláveis (34). Na Figura 39 a), é indicada a localização destes componentes na máquina.

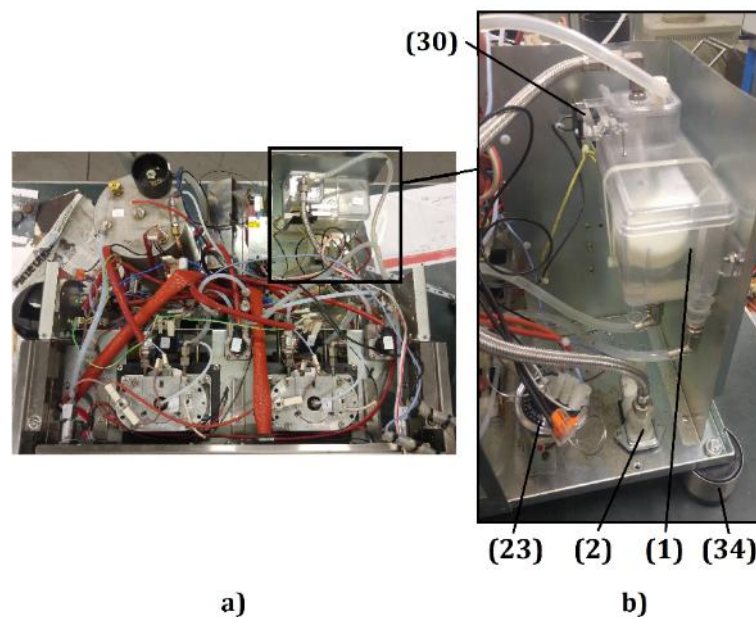


Figura 39 Identificação e indicação da localização dos componentes responsáveis pela entrada e fornecimento de água, na máquina. Também são identificados alguns componentes adjacentes; a) vista de cima da máquina com a localização dos componentes; b) identificação do depósito de água (1), da electroválvula de entrada de água (2), do termostato de segurança da resistência da placa (23), do *micro switch* do depósito (30) e das pés reguláveis (34).

Na Figura 40 a) observa-se a electroválvula (2) e na Figura 40 b) observam-se o *micro switch* (30) do depósito de água (1), em maior detalhe. Note-se que o *micro switch* (30) possui dois níveis, responsáveis por manter o nível de água no depósito (1) entre um nível mínimo e um nível máximo.

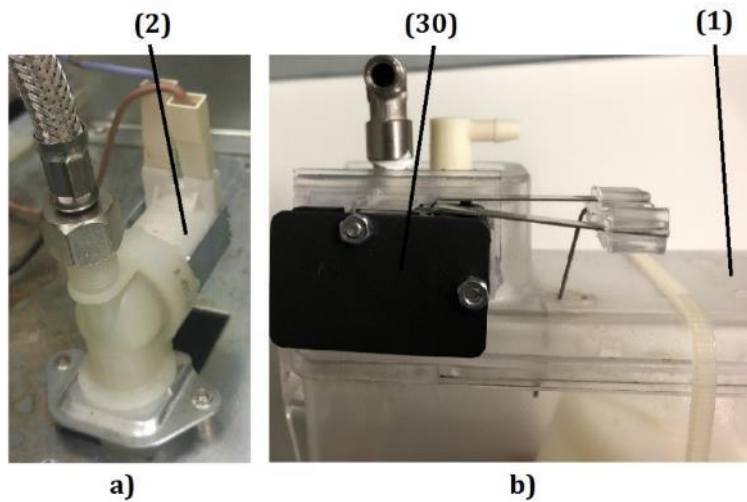


Figura 40 Destaque para os componentes responsáveis pela entrada e fornecimento de água à máquina; a) electroválvula de entrada de água (2); b) depósito de água (1) com o *micro switch* (30).

Em seguida, realizou-se uma modelação do depósito (1), em *Solidworks*® [60]. Na Figura 41 observa-se o resultado, após o *rendering*, com indicação de todas as entradas e saídas de água do depósito (1).

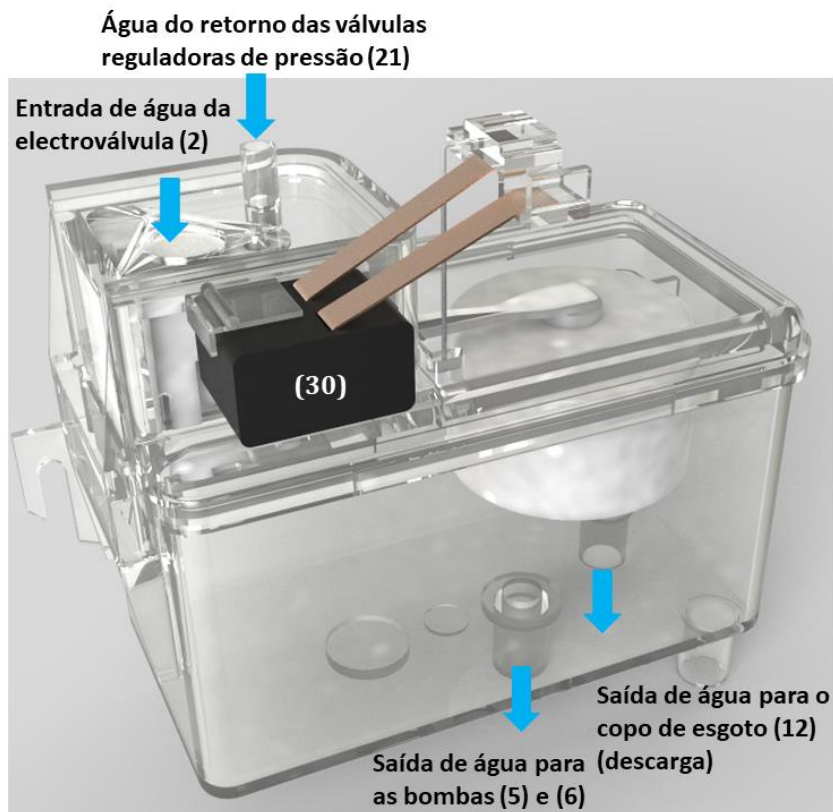


Figura 41 Modelação efetuada em *Solidworks*® [60] do depósito (1) e do seu *micro switch* (30), com indicação das entradas e saídas de água em todas as suas ligações.

Assim, a água entra no depósito a partir da electroválvula de entrada de água (2) e sai em direção às bombas da caldeira (5) e dos grupos (6). O depósito (1) também recebe a água proveniente da descarga efetuada pela válvula reguladora de pressão (21), existente à entrada do contador volumétrico (7) (Figura 33 b), sempre que esta deteta um excedente de pressão. Por fim, efetua uma descarga de água para o copo de esgoto (12) (Figura 42), que se junta à descarga da caldeira para o mesmo copo (Figura 32). Esta descarga é efetuada sempre que se pretende esvaziar por completo o depósito (1) ou por questões de segurança, para evitar que a água transborde, caso o sistema de controlo do nível de água avarie.

Este depósito diferencia-se dos depósitos habitualmente encontrados nas máquinas de café domésticas, por se encontrar diretamente ligado à rede, o que obriga à existência do mecanismo referido para controlar o nível de água. Nos depósitos mais comuns, a água é deposita manualmente pelo utilizador, sendo que este possui, apenas, uma pequena válvula de retenção unidirecional com mola, na zona inferior. Esta garante que, quando o depósito está fora da máquina, não existe passagem de água para o exterior (a válvula fica na posição de repouso), sendo que, quando este está encaixado na máquina, a válvula abre (a mola da válvula recolhe) e permite a passagem de água para os componentes da máquina. Na nova máquina a projetar, pretende-se o desenvolvimento de um depósito de 5l, com a possibilidade de combinar os dois sistemas (enchimento manual ou por ligação direta à rede).

Na Figura 42, observa-se a vista frontal da máquina parcialmente desmontada, com a identificação do copo de esgoto (12), do botão rotativo de três posições (24), do botão ON/OFF (25), dos botões do grupo (26), responsáveis por aquecer os termoblocos e dos botões de seleção do tamanho do café (27). Todos os botões são de atuação alternada, exceto os botões (27), identificados como “S” e “L”, que são de atuação momentânea.



Figura 42 Vista frontal da máquina, parcialmente desmontada, com identificação do copo de esgoto (12), do botão rotativo de três posições (24), do botão ON/OFF (25), dos botões do grupo (26) e dos botões de seleção do tamanho do café (27).

A máquina possui, ainda, uma resistência (37) colocada, posteriormente, pelos técnicos da BICAFÉ®, na parte superior, para aquecer as chávenas que são colocadas na placa (38) existente no seu topo. Nas Figura 43 a) e b) observam-se, respetivamente, a placa (38) e o conjunto placa (38) e resistência (37). O aquecimento desta resistência é controlado pelo termostato de segurança (23), visível na Figura 39 a).

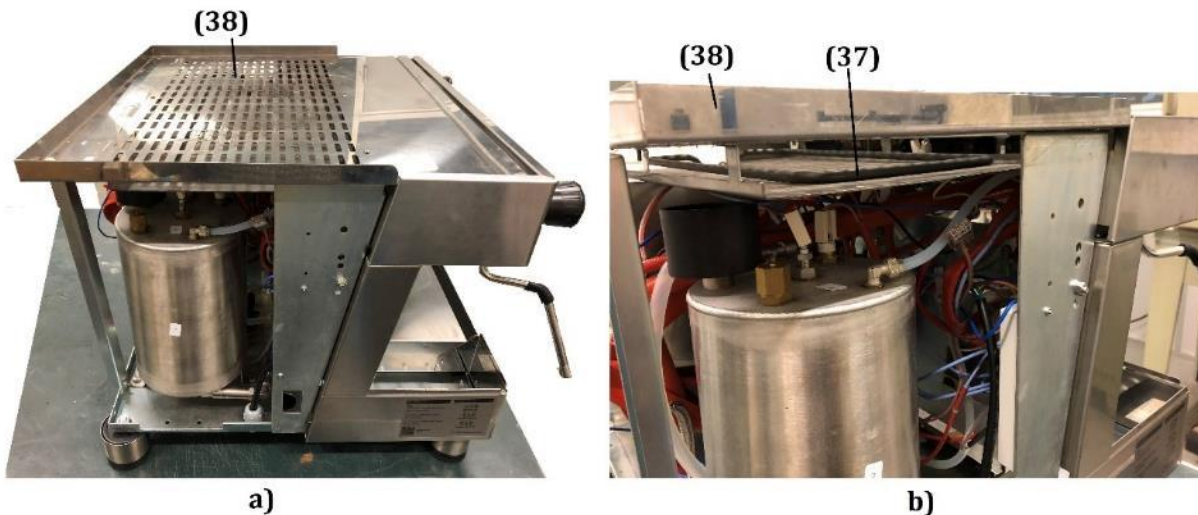


Figura 43 Máquina parcialmente desmontada; a) indicação da localização da placa (38) onde se colocam as chávenas; b) indicação da localização da resistência (37) que aquece a placa (38), onde se aquecem as chávenas.

Por fim, também é importante identificar os diversos tubos em silicone (33), por onde passa a água, os cabos elétricos (39) e o conjunto de *leds* (35) para a iluminação dos botões (27), da gaveta (31) e do topo da máquina.

A listagem de componentes termina com referência à placa eletrônica (36) e ao bloco eletrônico adicional (40), da Figura 44 b). Este bloco foi acrescentado, posteriormente, pelos técnicos da BICAFÉ® com o único objetivo de controlar a iluminação do topo da máquina, pelo que não vem implementado de origem. Na Figura 44 a) observa-se a localização destes componentes eletrônicos na máquina.

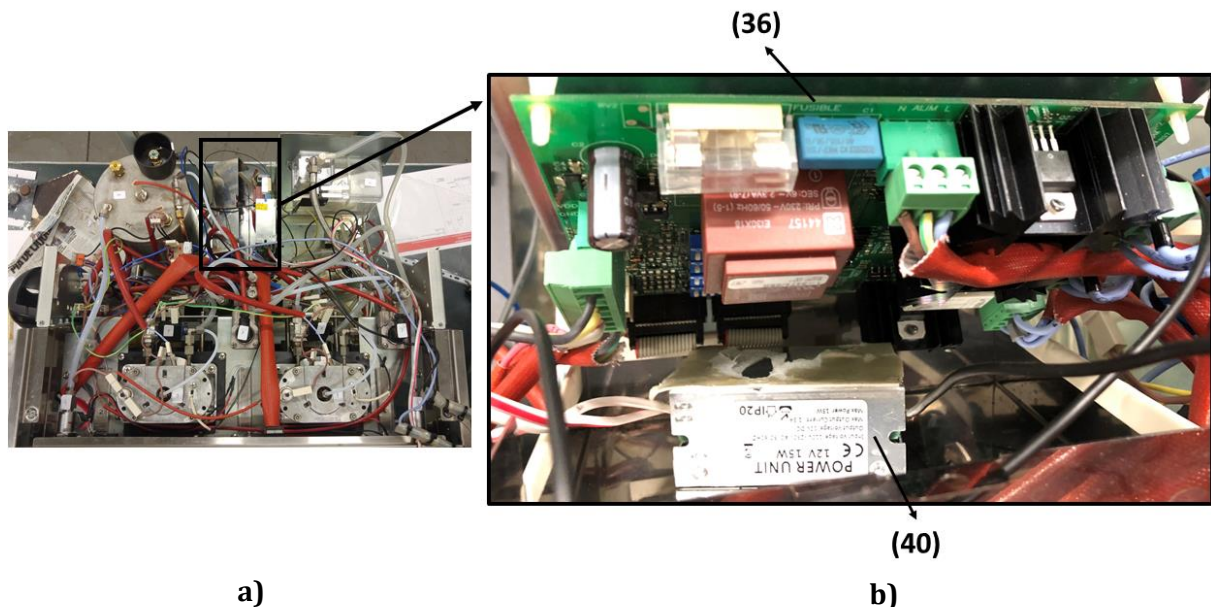


Figura 44 Identificação da placa eletrônica (36) e do bloco eletrônico adicional (40); a) vista de cima da máquina com a localização da placa (36) e do bloco (40); b) placa eletrônica (36) ampliada e identificação do bloco eletrônico adicional (40) para controlar a iluminação do topo da máquina.

3.2 Circuitos e funcionamento geral

Nas secções anteriores, a máquina foi dividida segundo os seus dois módulos funcionais, com o objetivo de se identificarem os seus componentes. Nesta secção, pretende-se definir a relação entre módulos, pelo estabelecimento de todas as ligações entre componentes. Tal é conseguido pela definição do circuito hidráulico e pelo conhecimento dos *inputs* e *outputs* da placa eletrónica (36) da máquina. Para todos os circuitos que se seguem, os componentes estão identificados de acordo com a numeração que lhes foi atribuída anteriormente.

3.2.1 Apresentação dos circuitos

Numa fase inicial, fez-se o levantamento do circuito hidráulico da máquina, utilizando-se os registos fotográficos dos componentes. Neste circuito são considerados, apenas, os componentes e as ligações por onde a água passa de modo direto. O resultado final encontra-se na Figura 45.

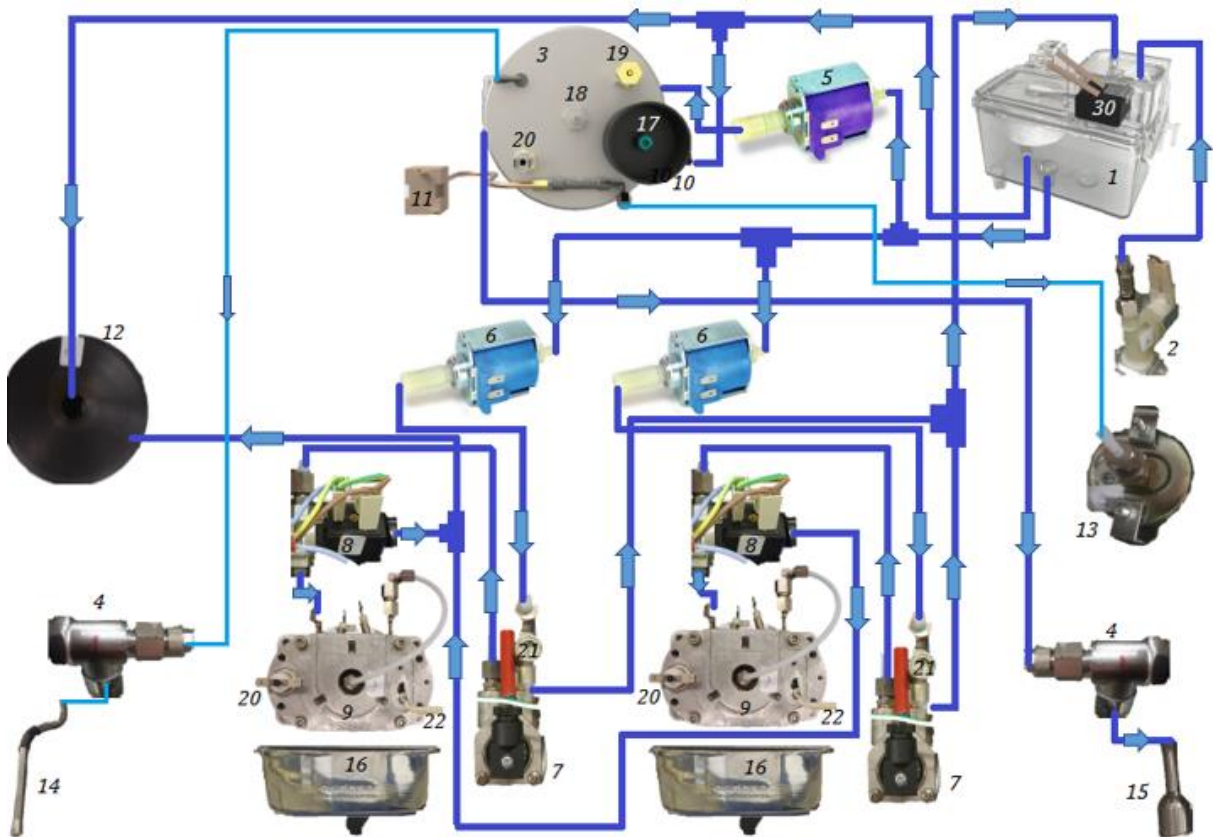


Figura 45 Circuito hidráulico inicial da máquina de café, com o registo fotográfico dos componentes.

Em seguida, utilizando o *Viso Professional*® [62], um programa de criação de diagramas, na categoria de *Fluid Power (Metric)*, substituíram-se as imagens dos componentes do circuito hidráulico da Figura 45, pela simbologia mais apropriada, existente na biblioteca do *software* e efetuaram-se ligeiras alterações que passam pela identificação mais detalhada dos grupos de extração (32) (Figura 46).

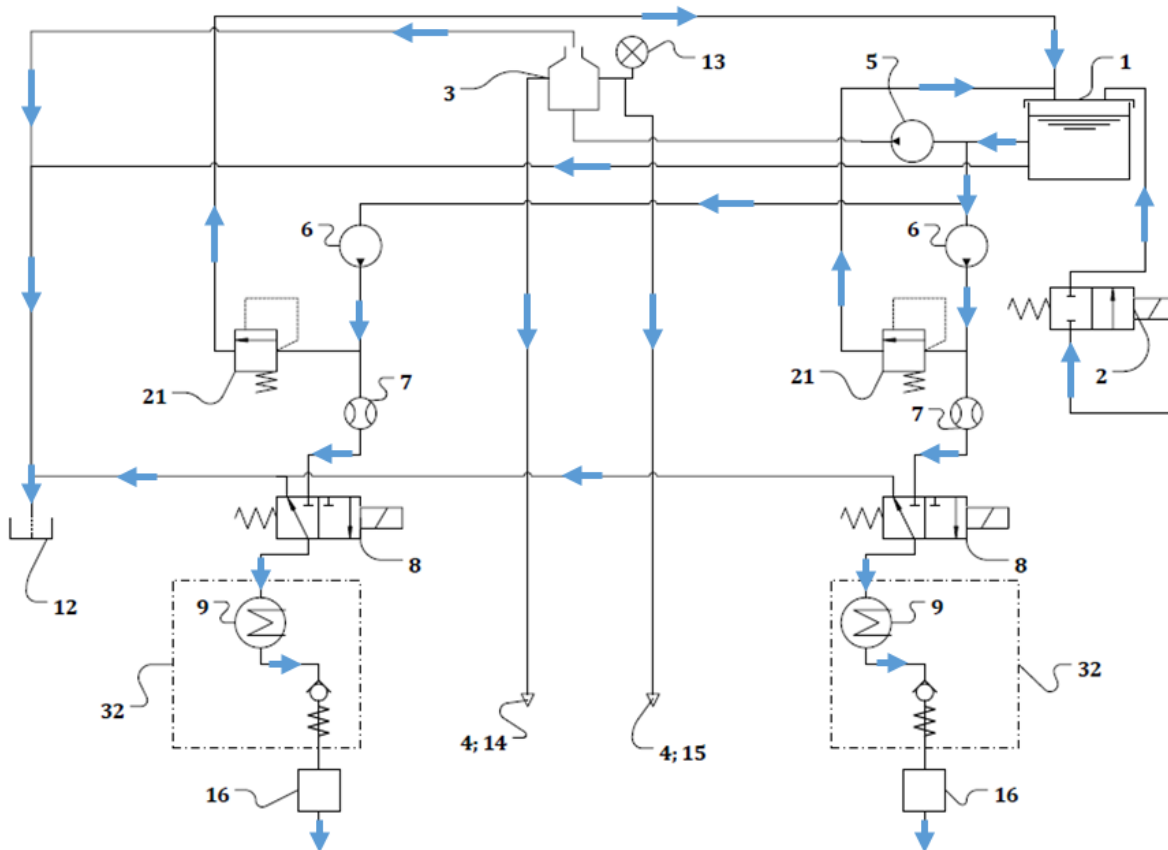


Figura 46 Circuito hidráulico final da máquina, com a simbologia mais indicada.

O circuito hidráulico da máquina permite conhecer o caminho total percorrido pela água desde que entra na máquina, até que sai, num dos módulos. No entanto, todas as ações destes componentes, desde a sua atuação inicial, até ao controlo do seu funcionamento são conseguidas devido à existência de um circuito elétrico, cujas funções são o fornecimento de energia elétrica e a ligação de todos os componentes à placa eletrônica (36) programada.

Assim, o circuito elétrico traduz-se num conjunto de ligações elétricas que estabelecem uma conexão entre:

- os terminais elétricos dos botões e a placa e entre os terminais elétricos dos elementos de sensorização dos componentes mecânicos e a placa (*inputs* da placa (36)) (Figura 121 do Anexo B);
- a placa e os terminais elétricos destes elementos de sensorização, para controlar o funcionamento dos componentes mecânicos (depósito (1), caldeira (3) e termobloco (9)) e entre a placa e os terminais elétricos dos componentes eletromecânicos (bombas (5) e (6), contadores volumétricos (7), electroválvulas (2) e (8) e resistência (37)), para os controlar (*outputs* da placa (36)) (Figura 121 do Anexo B).

Esta placa eletrônica (36) é, por isso, o centro de todo o esquema elétrico e, fazendo uso das informações provenientes dos botões e dos diversos sensores e *micro switches* (*inputs*), controla os componentes do circuito hidráulico (*outputs*), tal como representado na Figura 121 do Anexo B.

É nesta placa que estão programados todos os comandos e funções da máquina, desde a proteção dos componentes, às ordens de ligar e desligar cada componente, em função de determinados *inputs*, sendo definida toda a sequência de eventos. A placa eletrônica contém toda

uma lógica que contempla um conjunto de condições que se devem verificar, para que cada componente complete a sua função. Estas condições vão sendo referenciadas à medida que o funcionamento geral da máquina é explicado na secção 3.2.2. Para além da placa eletrónica (36), existe ainda o bloco lógico (40) adicional, acrescentado posteriormente pelos técnicos da BICAFÉ®, para controlar as luzes (35) do topo da máquina.

Com o circuito hidráulico definido e com os *inputs* e os *outputs* da placa eletrónica (36) detalhados, recorreu-se a um multímetro para identificar os locais pelos quais a corrente elétrica passa, sempre que determinados os botões da interface da máquina são atuados. As conclusões retiradas foram posteriormente confirmadas pelos técnicos da BICAFÉ® e o seu conhecimento é um importante auxílio para facilitar a compreensão do funcionamento geral da máquina. Assim, com a máquina completamente desligada, mas com água no circuito tem-se que:

- os botões dos grupos (26), responsáveis por aquecer os termoblocos (9), só funcionam quando o botão rotativo (24) sai da posição inicial (posição 0), ou seja, quando está nas posições 1 ou 2. O mesmo acontece para o botão ON/OFF (25) cuja atuação serve, somente, para ativar a iluminação da placa no topo máquina;
- a colocação do botão rotativo (24) na posição 1 liga a máquina e permite a passagem de corrente pela placa eletrónica (36) e por todos os componentes e dispositivos de proteção (estes ficam ativos, mas só funcionam efetivamente se um determinado conjunto de condições definidas na placa eletrónica (36) ocorrer). O botão ON/OFF (25) e os botões dos grupos (26) ficam ativos e a resistência (37) liga de imediato, aquecendo a placa superior (38) onde se colocam as chávenas;
- a colocação do botão rotativo (24) na posição 2 mantém as funções referidas da posição 1 e liga de imediato a resistência da caldeira (3), dando início ao aquecimento da mesma.

Assim, com a posição 1 do botão rotativo (24), e caso se verifique um conjunto determinado de outras condições, a mencionar posteriormente, o módulo de extração de café fica funcional, permitindo a preparação de cafés, embora não possibilite a obtenção de água quente e de vapor. Desta forma, a posição 2 permite que ambos os módulos estejam funcionais, enquanto a posição 1 só permite que o módulo de extração de café funcione. Trata-se de uma estratégia de poupança de energia, pois sempre que não for necessária a obtenção de água quente e de vapor de água, continua a ser possível tirar cafés sem aquecer a caldeira, pela colocação do botão rotativo (24) na posição 1.

No entanto, em situações normais em que já existe água no circuito e nos demais componentes, como é o caso quotidiano, a tendência é para os utilizadores deixarem o botão rotativo (24) permanentemente na posição 2, para evitar períodos de espera prolongados para aquecer a caldeira (3). Na prática, a posição 1 só é utilizada para encher a caldeira (3) e o depósito (1), quando estes estão vazios, como acontece quando a máquina é utilizada pela primeira vez ou vem de uma reparação.

Propõe-se a adoção de uma estratégia idêntica para o acionamento da resistência (37) que aquece a placa superior das chávenas, pois, na configuração atual, a partir do momento em que a máquina é ligada (botão rotativo (24) na posição 1 ou 2), a resistência está ligada, o que se traduz em grandes desperdícios energéticos.

3.2.2 Análise do funcionamento geral

Para os pontos seguinte, acompanhar a descrição com a observação do circuito hidráulico (Figura 45 e Figura 46) e da placa eletrônica (Figura 121 do Anexo B) tendo em consideração a numeração adotada para os componentes.

Considera-se que o botão rotativo (24) está na posição 0 e que a **máquina** se encontra completamente **desligada** e que ainda **não existe água no circuito** e nos demais componentes:

1. Colocando o botão rotativo (24) na posição 1:
 - 1.1. a corrente chega a todos os componentes da máquina, incluindo a placa eletrônica (36) e o botão ON/OFF (25) e os botões do grupo (26) ficam ativos;
 - 1.2. a resistência (37) liga e aquece a placa (38) existente no topo da máquina, na qual são colocadas as chávenas. O controlo do aquecimento é efetuado pelo termostato de segurança (23);
 - 1.3. a água chega à electroválvula de entrada de água (2), a partir da sua ligação à rede. Como o depósito (1) está vazio, a placa eletrônica (36) envia um sinal à válvula (2) para que esta permita a passagem da água para o mesmo, enchendo-o diretamente até ao nível superior do *micro switch* (30), a partir da sua ligação à parte superior do depósito (1). Este *micro switch* (30) é o responsável por determinar o nível de água no depósito (1) e assegurar que o mesmo está sempre compreendido entre um nível mínimo e um nível máximo pré-estabelecido. Quando a boia que flutua na água atinge o nível inferior do *micro switch* (30), é enviado um sinal elétrico à válvula de entrada (2), comutando-a e permitindo a entrada de água até que a boia atinja o nível superior. Este mecanismo singular de enchimento do depósito de água (1) é importante para assegurar que o mesmo nunca fica sem água, pois, caso contrário, a máquina não funcionaria. O depósito (1) contém duas saídas na parte de baixo: uma faz a descarga para o copo de esgoto (12) e a outra fornece água para a bomba da caldeira (5) e para as bombas dos grupos (6);
 - 1.4. como a caldeira está vazia, a sonda de nível (18) não deteta a presença de água, pelo a placa eletrônica (36) produz um sinal para que a bomba da caldeira (5) ligue e encha a caldeira (3), por baixo.

Assim que o depósito (1) e a caldeira (3) ficam cheios de água, torna-se possível analisar os dois módulos funcionais em separado.

Considere-se, primeiro, o **módulo de extração de café**:

2. Com o botão rotativo (24) na posição 1 ou 2:
 - 2.1. o utilizador seleciona o grupo que pretende utilizar para a obtenção de café, pressionando o correspondente botão do grupo (26). Se for o caso, pode utilizar os dois grupos em simultâneo, atuando os dois botões (26). A atuação destes botões inicia o aquecimento do termobloco (9). A temperatura nos termoblocos (9) é dada pela sonda de temperatura (22) presente nos mesmos. Caso a sonda (22) detete temperaturas superiores a 165°C¹, o termostato de segurança (20), presente em cada termobloco (9), dispara e corta o aquecimento;
 - 2.2. o utilizador introduz a cápsula na gaveta (16) e fecha-a. Após esta operação o *micro switch* (28) envia a informação à placa eletrônica (36) de que esta gaveta está fechada;
 - 2.3. o utilizador seleciona o tamanho do café nos botões (27). O tamanho “S” corresponde ao menor volume de café e o “L” ao maior e os respetivos botões são de atuação momentânea

¹ Temperatura indicada pelos técnicos da BICAFÉ® e corroborada pelo catálogo da Ascaso® [64].

(estes valores podem ser alterados pelos técnicos, mas não pelo utilizador). Caso o utilizador pretenda um café com uma quantidade de água personalizada, atua o botão (27) com a indicação “XL”. Este botão é de atuação alternada e a contagem só é terminada quando o utilizador o pressionar pela segunda vez. A informação relativa ao tamanho do café é enviada à placa eletrónica (36) que, por sua vez, envia esta informação ao contador volumétrico (37);

- 2.4. as bombas dos grupos (6) só ligam quando os termoblocos (9) estiverem quentes (90-106 °C²), os *micro switch* (28) e (29) detetarem, respetivamente, o fecho das gavetas onde se introduzem as cápsulas (16) e o fecho da gaveta onde se recolhem as cápsulas (31) e quando o utilizador tiver selecionado o tamanho do café nos botões (27);
- 2.5. uma vez verificadas todas as condições do ponto 2.4, as bombas (6) ligam, sendo que a água vai em direção aos contadores volumétricos (7), que contam um determinado volume de água selecionado pelo utilizador a partir dos botões (27);
- 2.6. ao entrar no contador volumétrico (7) a água passa primeiro pela válvula reguladora de pressão de água (21). Quando existe pressão excessiva, a água segue a saída da descarga em direção ao depósito (1) (retorno). A válvula (21) ajuda a uniformizar a pressão neste tipo de bombas vibratórias, bombas (5) e (6), que bombeiam a água por impulsos e não possuem uma pressão de funcionamento uniforme;
- 2.7. a restante água sai do contador, na quantidade exata, em direção à electroválvula de 3 vias (8) que, durante a extração de café, permite que esta passe para o interior dos canais de água do termobloco (9), aquecendo no seu interior, à medida que se dirige para a saída do mesmo;
- 2.8. à saída do termobloco (9) a água encontra-se quente e percorre todo o interior do grupo de extração (32), constituído por vários elementos, no qual se dá a fixação e compressão da cápsula, seguida da extração do café para a chávena³;
- 2.9. quando termina a tiragem do café, a electroválvula (8) comuta e a água que, eventualmente, tenha ficado no termobloco (9), retorna à electroválvula (8), que está num nível inferior ao termobloco (9). A electroválvula (8) faz uma descarga, enviando esta água remanescente para o copo de esgoto (12), no sentido de aliviar a pressão no grupo (32). Por fim, as cápsulas usadas caem pela rampa da gaveta (16), em direção à gaveta (31) (Figura 37).

Considere-se, agora, o **módulo de obtenção de vapor de água e água quente:**

3. Com o botão rotativo (24) na posição 2:
 - 3.1. inicia-se o aquecimento da água da caldeira (3) a partir da resistência existente no seu interior. Através do pressostato (11) ligado à caldeira (3) por uma ligação de cobre, controla-se a pressão de vapor no interior da caldeira e, conseqüentemente, o aquecimento da mesma até um determinado valor limite de pressão. No manómetro (13) faz-se a leitura destes valores de pressão que se pretendem sempre entre 1.3 e 1.5bar, para garantir que a produção de vapor e de água é rápida. O manómetro (13) e o pressostato (11) estão numa ligação em “T” na caldeira. Como o controlo da temperatura a partir do controlo da pressão não é exato, existe, ainda, um termostato de segurança (20) para se fazer o controlo direto da temperatura. Se existirem valores demasiado

² Temperatura indicada pelos técnicos da BICAFÉ® e corroborada pelo catálogo da *Ascaso*® [64].

³ No capítulo 4 é efetuada uma análise detalhada do grupo de extração (32), sendo apresentados todos os seus constituintes e explicado o seu funcionamento.

elevados de temperatura, este elemento dispara e interrompe, de imediato, o aquecimento da caldeira (3).

- 3.2. a caldeira possui uma válvula de respiro (19). Esta atua mecanicamente, fechando com a pressão do vapor gerado durante o aquecimento da água no interior da caldeira (3) e abrindo à medida que a água vai arrefecendo, permitindo a libertação dos gases. A inexistência desta válvula (19), pode resultar numa retenção de gases no interior de caldeira (3) quando a água fica fria e, conseqüentemente, num controlo errado da temperatura, quando se reiniciasse o aquecimento da mesma. Tal aconteceria porque o pressostato iria detetar, rapidamente, pressões elevadas “falsas” com a geração de novo vapor, que não corresponderiam, neste caso, a um real sobreaquecimento da água;
- 3.3. a caldeira tem uma válvula de segurança (17), que funciona a 2bar, com um recolhedor de água (10). Devido à eventual condensação de algum vapor (em quantidades residuais) que se vai libertando, este recolhedor (10) contém uma ligação ao canal de descarga do depósito (1) em direção ao copo de esgoto (12), permitindo a descarga desta água;
- 3.4. por fim, a caldeira tem duas ligações principais de saída: uma ligação à torneira (4) de saída de vapor (14) e uma ligação à torneira (4) de saída de água quente (15). A saída de água quente encontra-se na zona inferior da caldeira e a saída de vapor, na zona superior, já que este fica acumulado no topo (Figura 32).

4 Análise do grupo de extração

No capítulo 3 estudou-se a máquina de café unidoses atual, de forma a compreender o seu funcionamento e a conhecer a sua constituição.

No entanto, dada a importância do grupo de extração para o funcionamento geral de uma máquina de café unidoses e a sua constituição e funcionamento, relativamente complexos, é necessário dar início aos trabalhos de análise do mesmo de forma atempada e em simultâneo com o desenvolvimento do primeiro protótipo, para que, uma vez finda esta fase inicial do projeto, se possa iniciar, o mais rapidamente possível, o projeto e desenvolvimento de um novo grupo de extração.

Começa-se, então, por fazer uma análise da sua constituição e funcionamento, passando-se pela análise metalográfica de cada um dos seus constituintes e terminando-se na análise térmica, por elementos finitos, com recurso ao *Abaqus®*. Desta forma, o presente capítulo é um ponto de partida para a identificação de alguns problemas ou inconvenientes existentes no grupo atual e que podem ser melhorados aquando do desenvolvimento do novo grupo. Também são apresentadas, sempre que possível, algumas propostas de soluções, suportadas pelos resultados experimentais que vão sendo obtidos. Note-se que a gaveta (16) não foi considerada como parte do grupo de extração, pelo que não foi analisada.

4.1 Apresentação da constituição e montagem

Na máquina de café unidoses em estudo existem dois grupos de extração, responsáveis pela compressão das cápsulas que são introduzidas, pelo utilizador, nas respetivas gavetas. Estes estão dispostos na máquina, de acordo com a Figura 47.

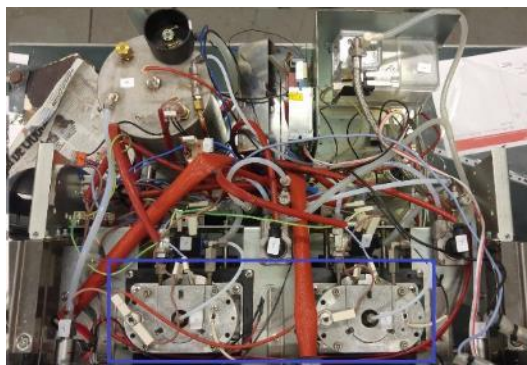


Figura 47 Vista de topo da máquina com a disposição dos grupos na mesma.

De forma a possibilitar a análise da sua constituição e do seu funcionamento, procedeu-se à desmontagem de um destes grupos. As Figura 48 a) a d) correspondem a um grupo de extração retirado da máquina, visto em vários planos, com os seus constituintes completamente montados.

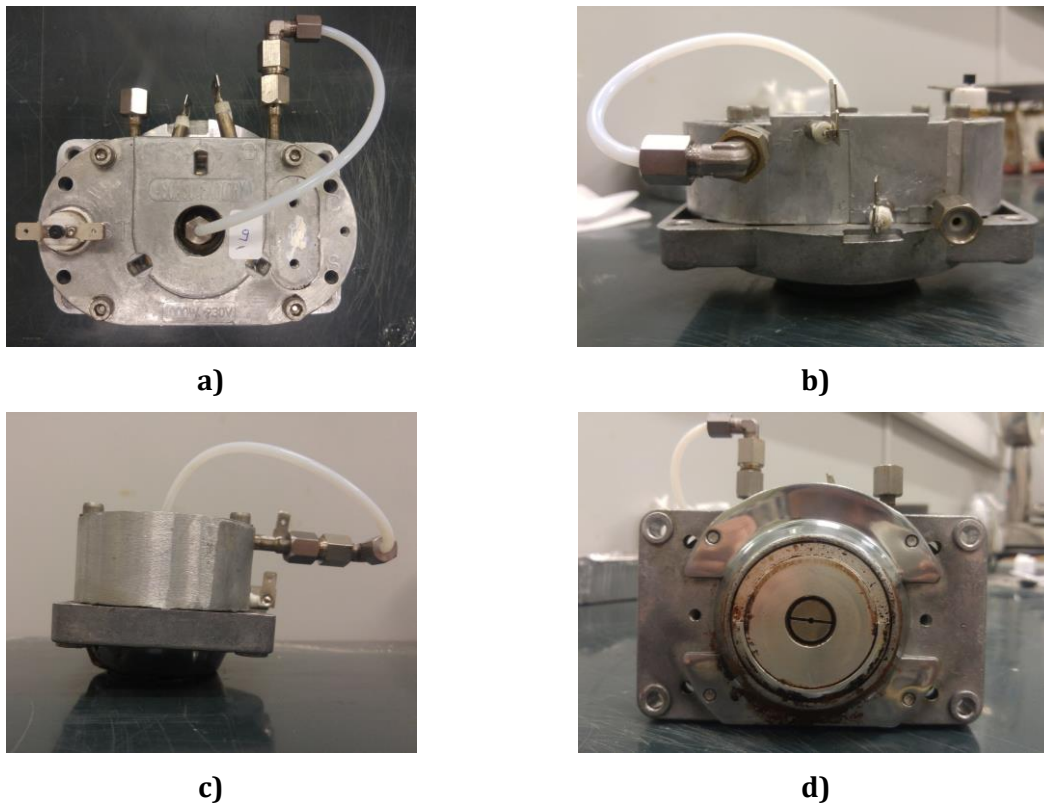


Figura 48 Grupo de extração da máquina, capturado em vários planos; a) vista de topo do grupo de extração; b) vista frontal do grupo de extração; c) vista lateral do grupo de extração; d) vista da base inferior do grupo de extração, onde se dá a compressão da cápsula.

Nesta fase é possível identificar alguns dos elementos do grupo de extração (Figura 49), nomeadamente, o termobloco de 1000W e 230V (a), fixo à base metálica de suporte (b), o termostato de segurança do termobloco (c), a resistência interna do termobloco (e) e a entrada (d_e) e saída (d_s) do canal de água do termobloco (Figura 49).

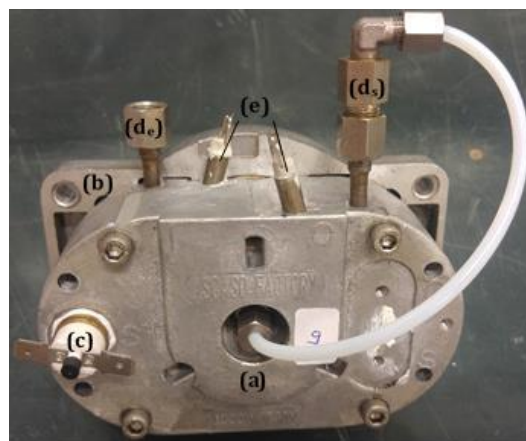


Figura 49 Grupo de extração: (a) termobloco, 1000W e 230V; (b) base metálica de suporte; (c) termostato de segurança do termobloco; (d_e) entrada do canal de água do termobloco; (d_s) saída do canal de água do termobloco; (e) resistência interna do termobloco.

A montagem do grupo à máquina é assegurada pela utilização de quatro parafusos com 30mm de comprimento, que fixam a base metálica de suporte do grupo a uma placa de suporte

em plástico⁴. Esta placa está fixa ao corpo da máquina a partir da utilização de quatro parafusos do mesmo tipo dos anteriores, mas com 8mm de comprimento. No anexo C1 é efetuada a caracterização destes parafusos, de acordo com a norma ISO, com o recurso ao livro de Desenho Técnico Básico [63].

Na Figura 50 estão evidenciados os furos da base (laranja), que alojam os parafusos responsáveis por fixar o grupo à placa em plástico.

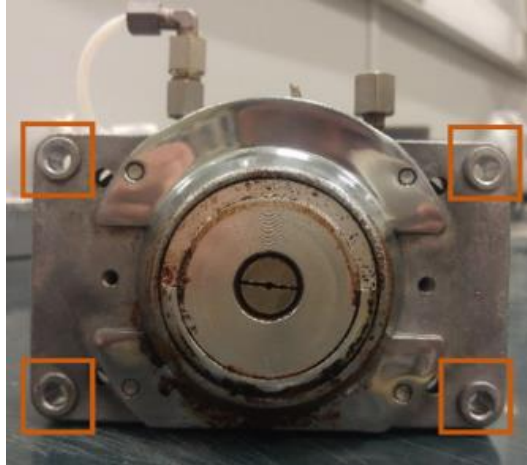


Figura 50 Base metálica de suporte do grupo com destaque dos furos onde se alojam os parafusos que permitem a fixação do grupo à placa de suporte em plástico.

Na Figura 51 está demonstrada a placa em plástico (elemento preto), com destaque para os furos que alojam os parafusos que permitem a fixação do grupo à mesma (laranja) e os furos que permitem o alojamento dos parafusos que garantem a sua fixação à máquina (azul).

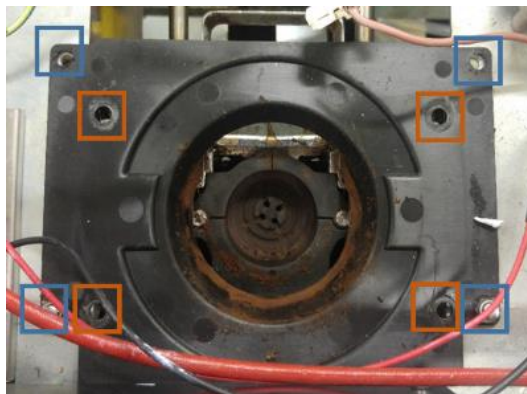


Figura 51 Placa de suporte em plástico com destaque, a laranja, os furos que alojam os parafusos que fixam o grupo à peça e os furos, a azul, que alojam os parafusos que fixam a placa ao corpo da máquina.

Uma vez extraído o grupo da máquina, inicia-se a desmontagem do grupo de extração, nos seus diversos componentes, começando-se por retirar os quatro parafusos que fazem a fixação entre o termobloco e a base metálica (Figura 52). No anexo C2, é efetuada a caracterização dos parafusos, de acordo com a norma ISO, recorrendo ao livro de Desenho Técnico Básico [63].

⁴ Trata-se de uma peça em plástico, como a representada na Figura 51. Como não existem mais informações acerca do material desta peça, no catálogo da empresa, não se pode especificá-lo com maior detalhe.

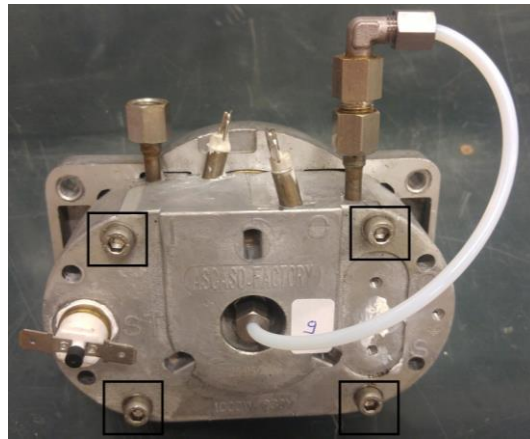


Figura 52 Grupo de extração com destaque para os quatro parafusos que garantem a fixação entre o termobloco e a base metálica.

Por fim, é possível separar o termobloco da base de suporte metálica, tendo-se acesso aos restantes componentes do grupo, que estão alojados na cavidade da base (Figura 53). Estes componentes estão dimensionados de forma a permitirem um encaixe perfeito entre si, pelo que não foram encontrados outros elementos de fixação. Assim, as suas dimensões e a correta sequência de montagem são suficientes para garantir o seu posicionamento relativo (Figura 53).

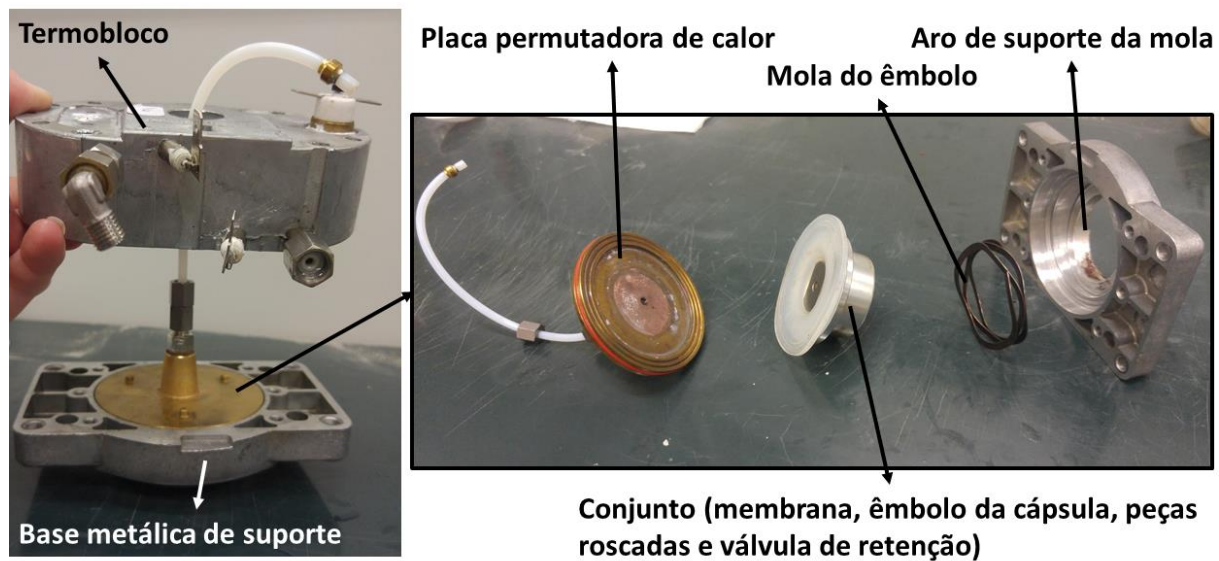


Figura 53 Separação do termobloco da base metálica de suporte e apresentação dos restantes elementos do grupo, pela sua ordem de montagem na cavidade da base.

Uma vez desmontado o grupo, recorreu-se ao *software SolidWorks®* [60] para se modelarem todos os componentes do grupo de extração nas suas dimensões reais. O objetivo principal desta modelação é o de obter uma melhor compreensão do mecanismo e do movimento relativo entre componentes. Para além disso, as vantagens da utilização de modelação 3D durante o desenvolvimento de produtos são já bem conhecidas, pelo que esta modelação também se revela útil em fases posteriores do projeto em que haja necessidade de modificar geometrias ou de recorrer a sistemas CAE (*computer aided engineering* – engenharia assistida por computador) para analisar algum componente em particular que se pretenda desenvolver.

Na Figura 54 encontra-se a vista explodida do grupo de extração da máquina *BICAFÉ®* em estudo, obtida após a modelação dos componentes em *SolidWorks®* [60] e após *rendering* da imagem, com a respetiva legendagem. A designação atribuída aos componentes segue a designação do catálogo [64] e norma de cada tipo de parafusos é obtida de acordo com o Anexo C.

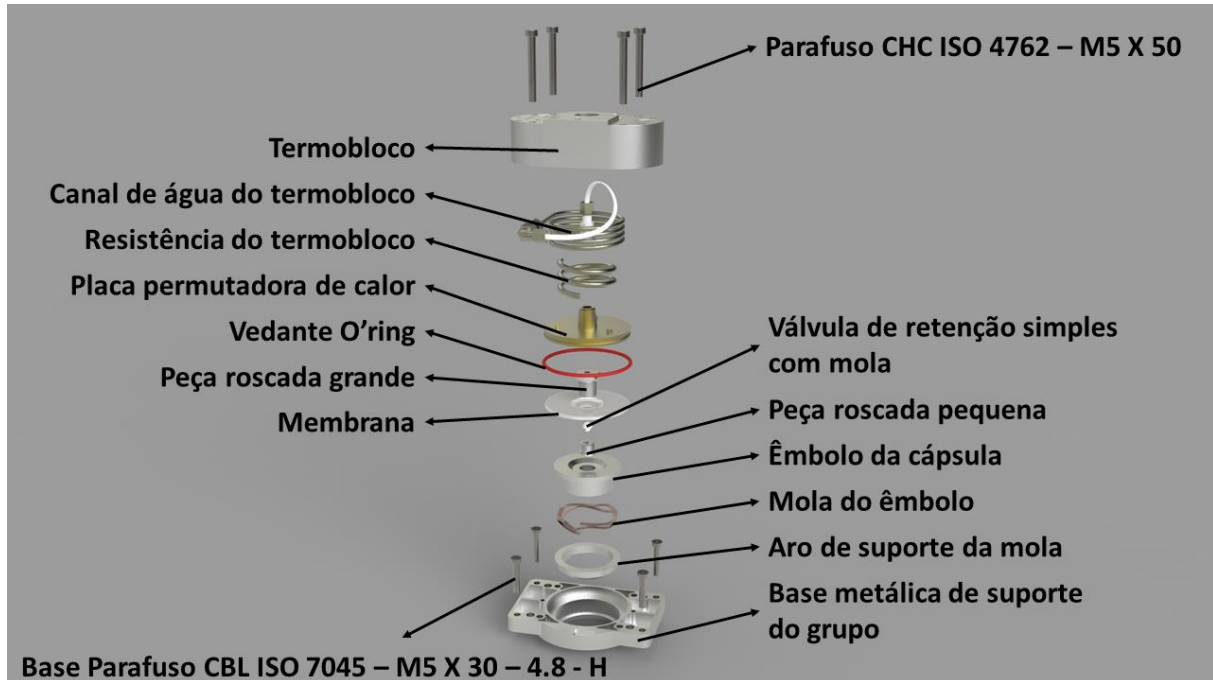


Figura 54 Vista explodida do grupo de extração, com todos os seus componentes modelados em *SolidWorks®* [60].

4.2 Análise do funcionamento

À semelhança do referido anteriormente, o funcionamento do grupo tem início com o aquecimento do termobloco, pelo acionamento dos botões (26). O acionamento destes botões liga a resistência interna do termobloco, aquecendo-o. A medição da temperatura é efetuada pela sonda de temperatura (22). Por questões de segurança, também existe um termostato (20) que corta o aquecimento, caso a sonda (22) detete temperaturas superiores a 165°C. Assim que o termobloco atinge uma temperatura pré-definida, normalmente entre os 90°C e os 106°C, a bomba do grupo liga e a água é bombeada a elevada pressão em direção a um contador volumétrico, passando por uma electroválvula de três vias, até chegar ao termobloco.

Ao chegar ao termobloco, a água entra no canal de água existente no seu interior, por d_1 (Figura 49), aquecendo por trocas de calor com o bloco metálico quente. Uma vez percorrido todo canal, a água sai por d_2 (Figura 49 e Figura 55) e entra no interior dos restantes componentes do grupo, alojados na cavidade da base metálica de suporte.

Para uma melhor compreensão do funcionamento do grupo de extração, após o aquecimento da água, considere-se a Figura 55, onde é apresentada uma vista em corte do grupo de extração modelado no *SolidWorks®* [60], com identificação de todos os seus componentes, completamente montados. Por baixo deste grupo, existe a gaveta (16), não representada na imagem, na qual o utilizador introduz a cápsula que fica alinhada com o êmbolo da cápsula identificado na Figura 55.

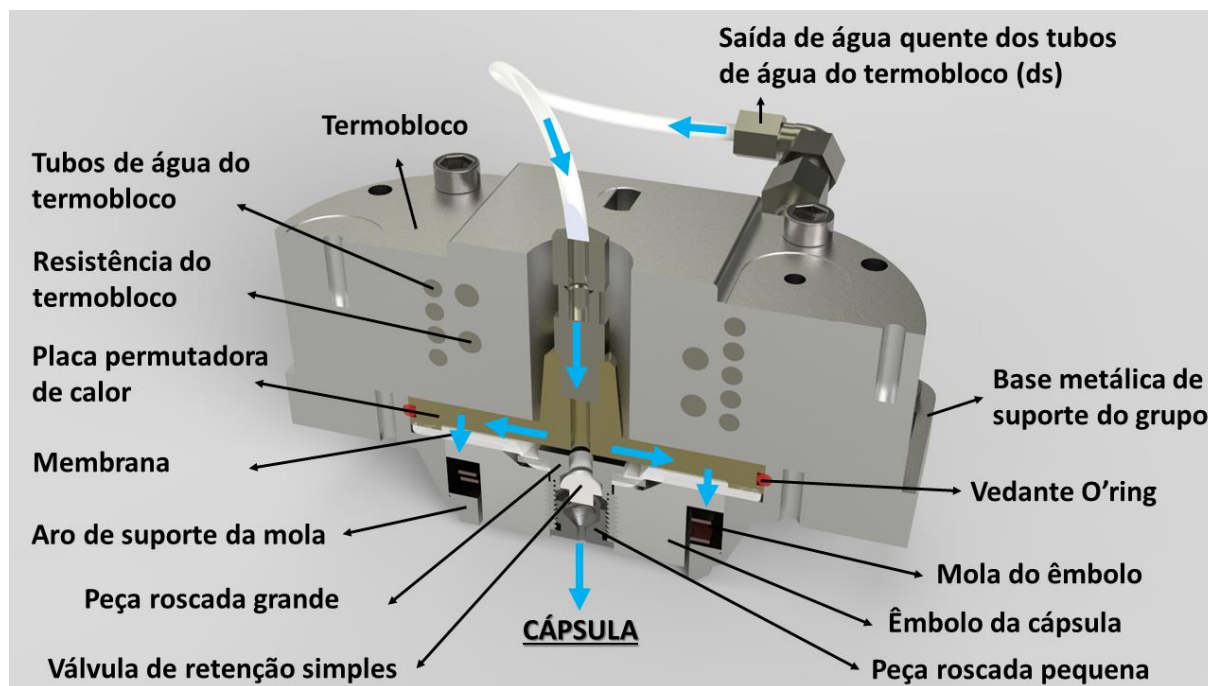


Figura 55 Vista em corte da modelação do grupo de extração com identificação dos seus componentes e com indicação da passagem da água no seu interior [60].

Findo o aquecimento da água no interior do termobloco, esta entra no grupo, passando no interior da placa permutadora de calor que, devido a fenómenos de transferência de calor com o termobloco, aquece, garantindo que todo o grupo de extração, incluindo a água que passa no seu interior, se mantenham quentes. Por esta razão, esta placa tem de ser construída num material com elevada condutividade térmica. O vedante O'ring tenta impedir a existência de perdas de água.

A água que atravessa a placa vai-se acumulando entre a placa e a membrana até que a pressão exercida pela mesma seja suficiente para comprimir o êmbolo da cápsula e a mola do êmbolo, apoiada num aro metálico. É neste movimento de descida do êmbolo que se dá a fixação e a compressão da cápsula colocada por baixo do grupo, na gaveta.

Em simultâneo, a água vai entrando dentro das peças roscadas e, quando a pressão exercida for suficiente para vencer o valor pré-definido da força da mola da válvula de retenção simples, dá-se a comutação da mesma, o que permite a passagem da água em direção à saída onde se encontra a cápsula. A válvula de retenção simples com mola impede que qualquer água da parte inferior do grupo de extração se dirija, de novo, em direção ao termobloco. Geralmente, a pressão necessária para comprimir a mola da válvula de retenção é superior à necessária para fazer descer o êmbolo pois, caso contrário, a passagem da água dar-se-ia sem a cápsula estar fixa.

Uma vez terminada a extração do café, dá-se a descompressão do grupo, o que se traduz no recuo da mola do êmbolo e dos restantes elementos. Assim, também a válvula de retenção, presente no interior da peça metálica, regressa à posição de repouso, vedando a saída do grupo e impossibilitando a passagem de água para o exterior. A temperatura do café obtido ronda os 80°C, de acordo com os técnicos da *BICAFÉ®*.

Devido ao movimento constante de compressão e descompressão, à elevada pressão que é necessária para fazer comprimir a mola do êmbolo e ao contacto direto da água com os diversos elementos do grupo, é frequente identificar alguns problemas de desgaste das peças, sobretudo na membrana. O correto funcionamento do grupo só é garantido com a aplicação de pressão adequada que, idealmente, é a que alia um menor desgaste dos componentes a uma maior rapidez

desejável no processo de compressão da cápsula. Para tal seria necessário fazer uma análise de esforços no grupo, tendo em consideração propriedades das molas e a pressão necessária para se dar o rebentamento das cápsulas.

Na presente máquina sabe-se, apenas, que a pressão de funcionamento das bombas de vibração de cada grupo é de 16bar e que, desde que o termobloco está quente até começar a extração do café para chávena, existe um período de 8 a 10s, necessário para a água chegar ao termobloco, percorrer o interior, comprimir a mola do êmbolo, comutar a válvula de retenção e infiltrar os pós de café da cápsula.

4.3 Análise metalográfica dos constituintes

Em seguida segue-se a análise e reflexão dos resultados obtidos durante a análise metalográfica dos principais componentes do grupo de extração.

Para cada um dos componentes em estudo fez-se uma análise da suas macroestruturas e microestruturas, determinou-se a sua massa volúmica e, sempre que possível, mediram-se as suas durezas na superfície exterior da peça. Também se mediram as durezas das respetivas amostras que, contemplam sempre partes do interior dos componentes, podendo existir diferenças de dureza em relação à superfície do mesmo. Por fim, determinou-se a composição química com recurso a um espectrómetro, o qual faz uma descarga elétrica sobre a peça, permitindo que, através dos comprimentos de onda, se possam determinar as concentrações de cada elemento químico presente na liga.

A preparação das amostras para analisar ao microscópio ótico segue a metodologia mais comum para a maioria dos metais, descrita em [65], tendo sido cortadas, montadas em resina, desbastadas em lixas de SiC de diferentes granulometrias (pré-polimento), polidas em panos de feltro com pós de diamante (acabamento) e, por fim, atacadas com o reagente mais adequado à sua composição química.

4.3.1 Termoblocos

Nesta secção são apresentados e analisados três termoblocos de três máquinas distintas. Os objetivos são estudar a solução construtiva de cada um, identificar o seu processo de fabrico e caracterizar os seus materiais, no sentido de avaliar o grau de impacto destes aspetos no seu desempenho global.

Nas Figura 56 a) a c) são apresentadas as máquinas às quais pertencem cada um dos termoblocos em estudo. Nas Figura 57 a) a c) são apresentados os termoblocos, com a identificação da sua localização na respetiva máquina. Todos os termoblocos pertencem a máquinas que já foram utilizadas regularmente, pelo que o seu estado de conservação não é o de origem.

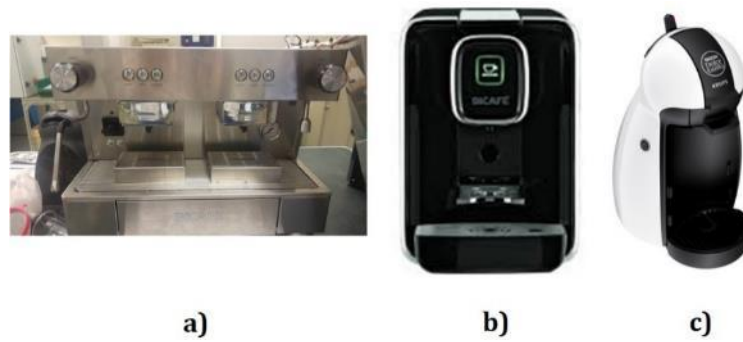


Figura 56 Máquinas dos termoblocos em estudo; a) máquina dupla de unidoses da *BICAFÉ®*; b) máquina de unidoses doméstica da *BICAFÉ®*; c) máquina de unidoses doméstica da *KRUPS®*, na versão *DOLCE GUSTO*.

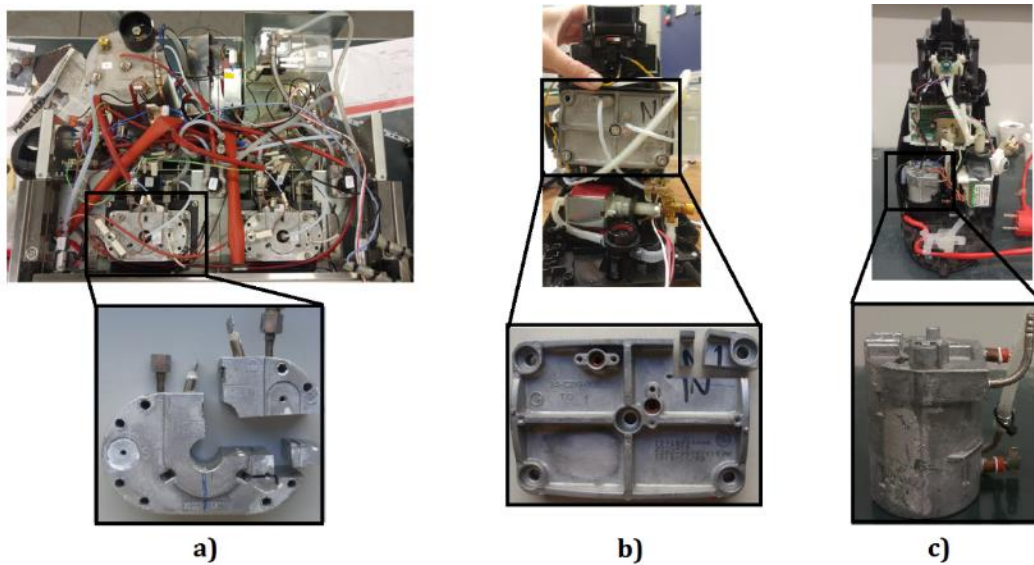


Figura 57 Localização de cada termobloco na respetiva máquina; a) Máquina dupla de unidoses da *BICAFÉ®* e respetivo termobloco (A); b) máquina de unidoses doméstica da *BICAFÉ®* e respetivo termobloco (B); c) máquina de unidoses doméstica da *KRUPS®*, na versão *DOLCE GUSTO*, e respetivo termobloco (C).

Por uma questão de simplificação considere-se que os termoblocos A, B e C são, respetivamente, os termoblocos das máquinas a), b) e c) da Figura 56.

Antes de se efetuar qualquer tipo de corte ou alteração nos termoblocos, começou-se por fazer uma avaliação da sua forma, identificando-se alguns aspetos importantes da sua estrutura, que podem ser indicadores do processo de fabrico utilizado. Considerem-se, então, as Figura 58 a) e b), Figura 59 a) a c) e Figura 60 a) e b).

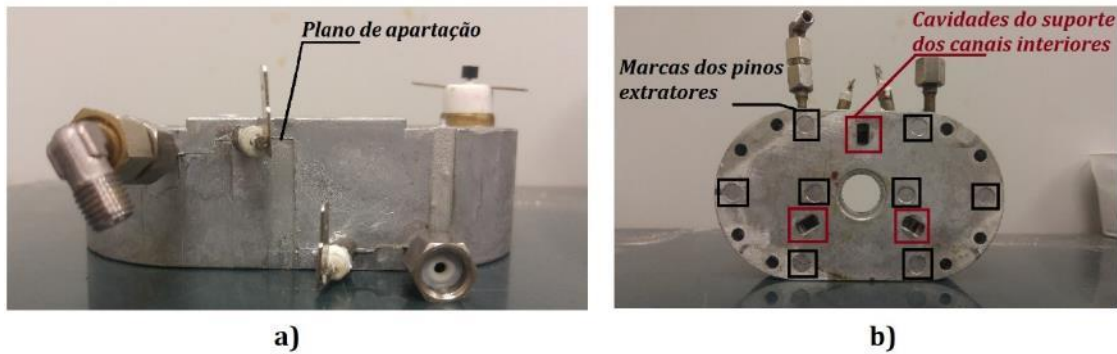


Figura 58 Termobloco A; a) destaque para o plano de separação; b) destaque para as marcas dos extratores e para as cavidades resultantes do suporte utilizado para fixar a posição dos canais da água e da resistência no interior do molde.

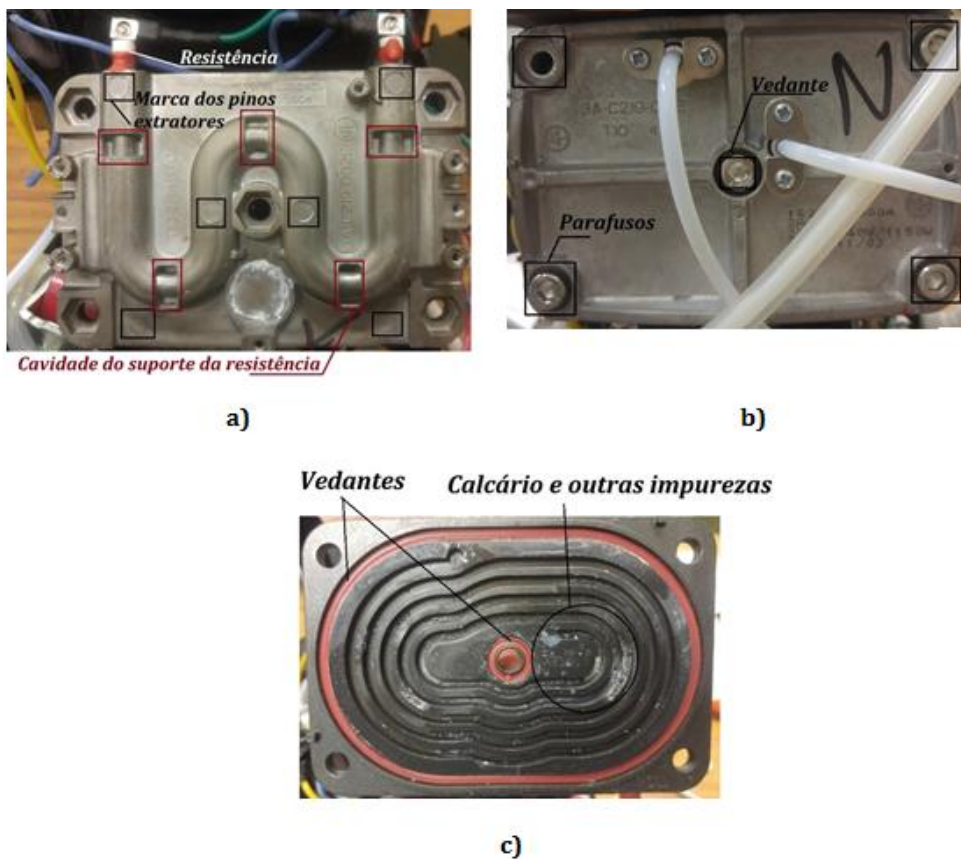


Figura 59 Termobloco B; a) vista exterior da metade do termobloco B com resistência. Destaque para as marcas dos extratores e para as cavidades resultantes do suporte utilizado para fixar a posição da resistência no interior do molde; b) vista exterior da metade do termobloco B sem resistência, onde se observam o vedante na zona central e os parafusos que unem as duas metades; c) vista interior de uma das metades do termobloco, observando-se os canais por onde circula a água e alguns vedantes. Destaque para a existência de calcário e impurezas que bloqueiam os canais.

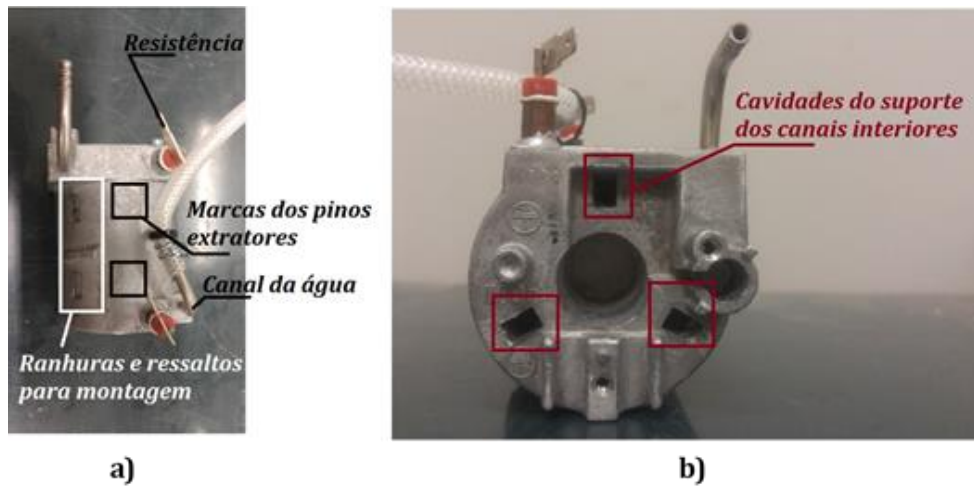


Figura 60 Termobloco C; a) destaque para as marcas dos extratores e para a existência de ranhuras e ressaltos cuja função é posicionar o termobloco nos encaixes existentes na máquina; b) destaque para as cavidades resultantes do suporte utilizado para fixar a posição dos canais da água e da resistência no interior do molde.

Numa primeira observação, tendo em consideração as geometrias e as qualidades superficiais dos termoblocos, percebe-se que estes são possivelmente obtidos por fundição. A posterior identificação de diversas marcas deixadas pelos pinos extratores, vem reforçar esta ideia (Figura 58 b), Figura 59 a), Figura 60a). Em particular, no termobloco A, também é possível identificar o plano de separação que segue o nível dos canais no seu interior (Figura 58 a).

Os termoblocos apresentam soluções construtivas distintas. Os termoblocos A (Figura 58) e C (Figura 60) são um bloco maciço de metal fundido e possuem os canais para a circulação da água e a resistência, em espiral, no seu interior. Para tal, é necessária a introdução manual dos canais da água e da resistência no interior do molde vazio e a utilização de algum tipo de suporte que garanta o posicionamento dos mesmos, durante o posterior vazamento da liga. Por esta razão é possível identificar três cavidades assinaladas nas Figura 58 b) e Figura 60 b) que resultam da remoção do suporte. De notar que, embora semelhantes em termos funcionais, o termobloco C está disposto na vertical e possui um menor volume de material, apresentando um *design* mais compacto do que o termobloco A. Em contraste com os restantes termoblocos, que estão fixos à máquina por parafusos, o termobloco C possui ranhuras e relevos para permitirem o seu encaixe no corpo da máquina (Figura 60 a).

Por outro lado, o termobloco B da Figura 59 é constituído por duas metades fundidas individualmente que se aparafusam, sendo que a água circula por entre as mesmas. Já a resistência está presente na parte de exterior de uma das metades (Figura 59 a), sendo posicionada no interior do molde, aquando do vazamento, por algum tipo de suporte, razão pela qual também se identificam cavidades. De realçar a existência de vedantes, nas Figura 59 b) e c), para evitar a ocorrência de perdas de água. Esta solução, mais barata do que as restantes, apresenta alguns problemas, bem conhecidos pelos técnicos de manutenção da BICAFÉ®, como a perda frequente de água, seja porque os vedantes são pouco eficazes ou pelo facto de os parafusos existentes não serem suficientes para garantir o fecho devido das duas metades.

Por fim, qualquer um dos termoblocos está sujeito à possibilidade de bloqueio dos seus canais de água, tanto pela deposição de impurezas como pela formação de calcário. O termobloco B tem a vantagem, em relação aos demais, de possuir uma solução construtiva que permite a limpeza mais fácil dos mesmos, pois existe um acesso direto aos canais da água pela separação das duas metades (Figura 59 c).

Posto isto, definiram-se os planos de corte com interesse para obter as amostras para análise. Os cortes efetuados encontram-se nas Figura 61 a), b) e c) para os termoblocos A, B e C, respetivamente.

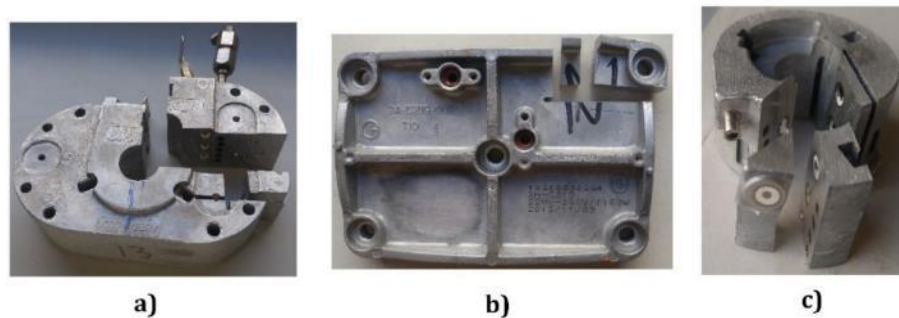


Figura 61 Identificação dos planos de corte em cada termobloco; a) termobloco A seccionado; b) termobloco B seccionado; c) termobloco C seccionado.

Em primeiro lugar, fizeram-se as análises das macroestruturas dos termoblocos. Para a análise macroestrutural do termobloco A, considere-se a Figura 62, onde estão indicados os tubos da água e a resistência, com os respetivos diâmetros e constituições, e onde são evidenciadas algumas heterogeneidades.

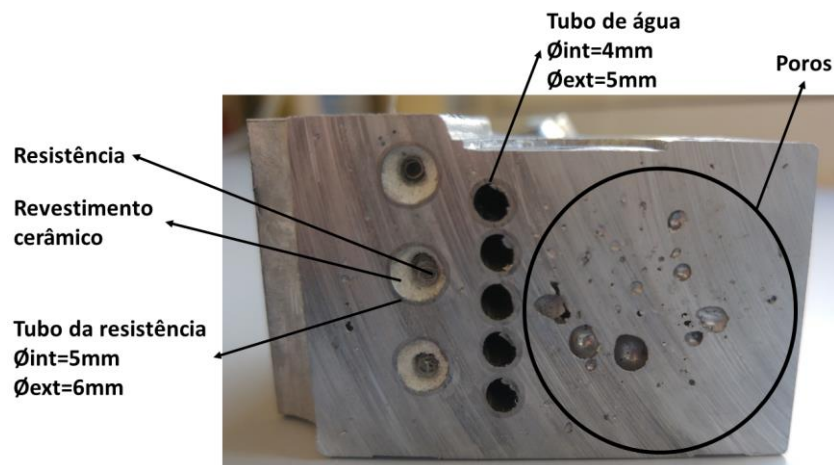


Figura 62 Macroestrutura do termobloco A, com identificação dos tubos da água e dos componentes da resistência. Destaque para a existência de vários poros.

Observando-se a figura anterior, constata-se que os tubos de água, de menor diâmetro, são colocados em espiral em torno da resistência. Esta, por sua vez, encontra-se mais próxima do centro do termobloco estando, também, em espiral. Quer os tubos da água, quer os da resistência, apresentam espessuras muito reduzidas. A posterior caracterização dos materiais destes tubos permite concluir que se tratam de tubos em aço inoxidável, sendo que os resultados obtidos podem ser encontrados no final desta secção. A existência de um revestimento cerâmico que envolve a resistência elétrica, justifica-se pelas suas conhecidas propriedades refratárias, funcionando como um isolador elétrico.

Observa-se, ainda, a existência de uma elevada percentagem de porosidade. A porosidade refere-se a vazios ou poros existentes numa peça fundida e são indesejáveis, pois deterioram significativamente as propriedades mecânicas da peça. Os poros podem surgir por várias razões,

como pela retenção de gás ou, então, pela formação de cavidades (“rechupes”), resultantes da contração do material durante a solidificação, aliada a uma inadequada alimentação de material durante a fase final de solidificação. Em relação à retenção de gás, sabe-se que a solubilidade do gás no metal é maior quando este está no estado líquido e a temperaturas elevadas, diminuindo à medida que solidifica, o que resulta em bolhas de gás retidas. A existência de turbulência ou agitação durante a solidificação, origina um aumento da solubilidade dos gases no metal [66]. Neste caso em particular, é possível que os poros existentes no termobloco A sejam o resultado de uma ineficiente desgaseificação da liga, aliada a uma turbulência gerada pela pré-existência dos canais no interior do molde, aquando do vazamento da liga. Tendo em consideração a espessura do termobloco é provável que este tenha sido obtido por fundição em coquilha.

Na Figura 63 encontra-se a macroestrutura do termobloco B.

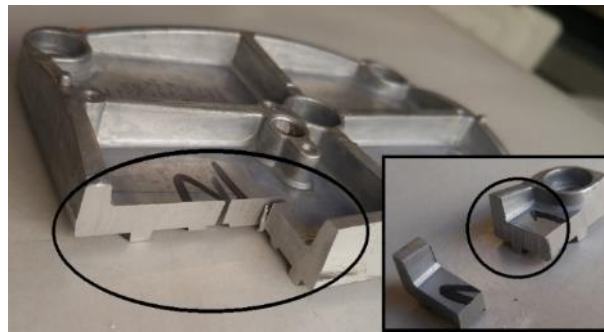


Figura 63 Macroestrutura do termobloco B.

Em contraste com o termobloco A, não se registam porosidades nem outras heterogeneidades significativas, o que pode estar relacionado com o facto de a peça possuir uma espessura mais fina, permitindo um maior controlo dos parâmetros de solidificação. Trata-se, também, de uma peça com um *design* e uma solução construtiva mais simples e mais comuns em processos de fundição, onde não existem tubos interiores ou outros componentes que possam estar na origem de turbulências. O facto de a peça possuir uma espessura mais fina pode ser um indicador de que esta é obtida por fundição injetada.

Para a análise da macroestrutura do termobloco C considere-se a Figura 64, onde estão indicados os tubos da água e a resistência, com os respetivos diâmetros e constituições, sendo evidenciadas algumas heterogeneidades.

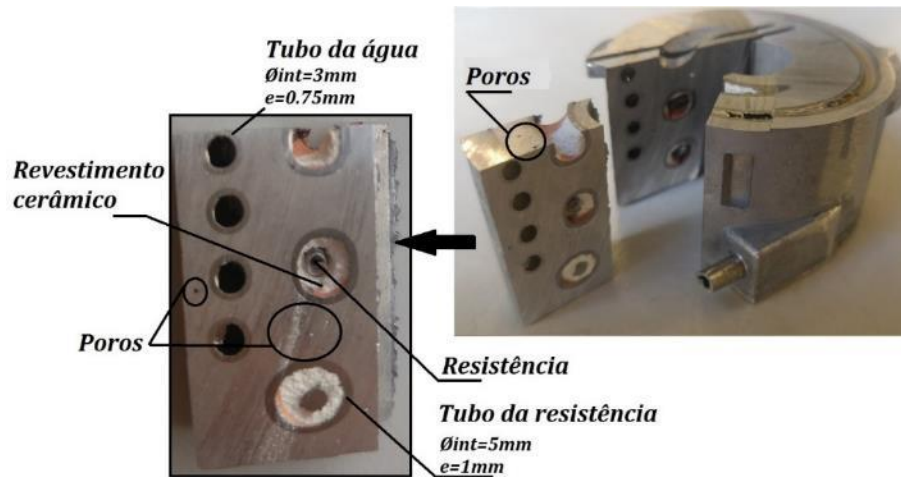


Figura 64 Macroestrutura do termobloco C, com identificação dos tubos da água e dos constituintes da resistência. Destaque para a existência de vários poros.

Observando a figura anterior, conclui-se que os termobloco C e A são bastante semelhantes, no que respeita à sua constituição interna. Os tubos de água, de menor diâmetro, são colocados em espiral em torno da resistência. Esta encontra-se na zona mais interna do termobloco, igualmente, em espiral. Quer os tubos da água, quer os da resistência, apresentam espessuras muito reduzidas. No caso da resistência existe, novamente, um revestimento cerâmico dentro do tubo. A caracterização dos tubos encontra-se no final desta secção.

Tal como no termobloco A, também neste é possível observar alguma porosidade. As razões para a existência desta porosidade podem ser explicadas da mesma forma, isto é, por uma ineficiente desgaseificação da liga, aliada a uma turbulência gerada pela pré-existência dos canais no interior do molde, aquando do vazamento da liga. Tendo em consideração a espessura deste termobloco é muito provável que este seja obtido por fundição em coquilha.

O passo seguinte passa pela tentativa de identificar a liga utilizada, pelo que se determinaram as massas volúmicas e se mediram as durezas superficiais (HV) de cada termobloco. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 Resultados obtidos para a massa volúmica de cada termobloco (arredondados às centésimas) e para a dureza superficial média (arredondado às unidades), com uma carga de 20kg.

	Termobloco A	Termobloco B	Termobloco C
Massa volúmica [g/cm³]	2.46	2.64	3.13
Dureza superficial média [HV]	100	70	88

Consultando as tabelas da *Aluminum Association* (Associação do Alumínio), que registam a composição química das ligas de alumínio mais comuns em fundição, é possível encontrar ligas com uma composição próxima das encontradas nestes termoblocos, após a espectrometria. Estas tabelas também indicam o tipo de processo de fundição mais adequado a cada liga [67]. Na Tabela 2 encontram-se os resultados obtidos, com a indicação das ligas registadas que possuem a composição química mais semelhante à das ligas em análise.

Tabela 2 Composição química das ligas de cada termobloco e identificação da liga de alumínio para fundição, registrada pela *Aluminum Association*, com a composição mais próxima de cada uma (A336, A339, A361); (a) D, *die casting* (fundição injetada); P, *permanent mold casting* (fundição em coquilha) [67].

		Liga; produto (a)	Composição química (%)							
			Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Residual
Termobloco A	Obtido		85.5	11.46	0.999	1.38	0.0829	0.201	0.302	0.0751
		A336; P	-	11-13	1.2	0.5-1.5	0.35	0.7-1.3	0.35	-
Termobloco B	Obtido		87.7	10.38	0.684	0.492	0.174	0.414	0.277	0.079
		A361; D	-	9.5-10.5	1.1	0.5	0.25	0.4-0.6	0.50	-
Termobloco C	Obtido		84.8	11.18	0.807	1.66	0.183	0.265	0.821	0.284
		A339; P	-	11-13	1.2	1.5-3	0.5	0.5-1.5	1	-

Analisando a tabela anterior, verifica-se que as ligas são compostas, maioritariamente, por alumínio e silício, contendo também outros elementos cuja quantidade varia de liga para liga.

De facto, as adições de silício ao alumínio puro caracterizam-se pelo notório melhoramento das propriedades de fundição, melhorando bastante a fluidez (ou colabilidade), resistência à fissuração a quente (*hot tear resistance*) e as questões relacionadas com a alimentação. Geralmente, as quantidades de silício recomendadas dependem do processo de fundição a utilizar. As adições de silício também contribuem para uma redução do coeficiente de expansão térmica. No entanto, as ligas de alumínio-silício (Al-Si) raramente são binárias e, tal como neste caso, possuem outros elementos cujo objetivo é melhorar as suas propriedades.

As adições de ferro, por exemplo, funcionam como um desmoldante da peça fundida, isto é, reduzem a tendência da peça para ficar agarrada no molde ("*die sticking*"). Contudo, o aumento do teor de ferro é acompanhado por uma redução da ductilidade. Por vezes, o ferro participa na formação das fases de "*sludge*" com o manganês e o crómio, o que corresponde à formação de lixo ou "escória" [68].

Como a adição de outros elementos à liga binária de Al-Si altera o seu ponto eutético, as ligas em estudo não devem ser consideradas, do ponto de vista teórico, ligas binárias de Al-Si. Esta é a razão pela qual as ligas que mais se aproximam das ligas em estudo são do tipo 3xx.x que, de acordo com a *Aluminum Association*, são ligas de alumínio-silício que contêm magnésio e/ou cobre e não as do tipo 4xx.x, isto é, ligas binárias alumínio-silício, de acordo com a mesma associação [67]. As ligas do tipo 3xx.x são particularmente apelativas pelas suas propriedades mecânicas, resistência à corrosão, maquinabilidade, resistência à fissuração a quente, fluidez e soldabilidade [68], o que justifica a sua seleção para este tipo de aplicações onde o termobloco está sujeito a temperaturas elevadas, estando em contacto com a água.

No entanto, por uma questão de simplificação e conveniência, considere-se que se está perante ligas binárias de Al-Si. A partir do diagrama de fases para as ligas binárias de Al-Si da Figura 65 tem-se que a temperatura do eutético é de 577°C, sendo que a respetiva composição é de 12% de Si. Ligas com um teor de Si inferior a 12% são, teoricamente, hipoeutéticas, enquanto as ligas com um teor superior a 12% são hipereutéticas [66]. Na prática, o valor do teor de silício para o qual se considera uma liga como eutética pode variar entre 10 a 13% [69]. Desta forma, tendo em consideração a sua composição química, as ligas dos termobloco em estudo podem ser consideradas hipoeutéticas ou aproximadamente eutéticas, sendo as ligas com melhor fluidez.

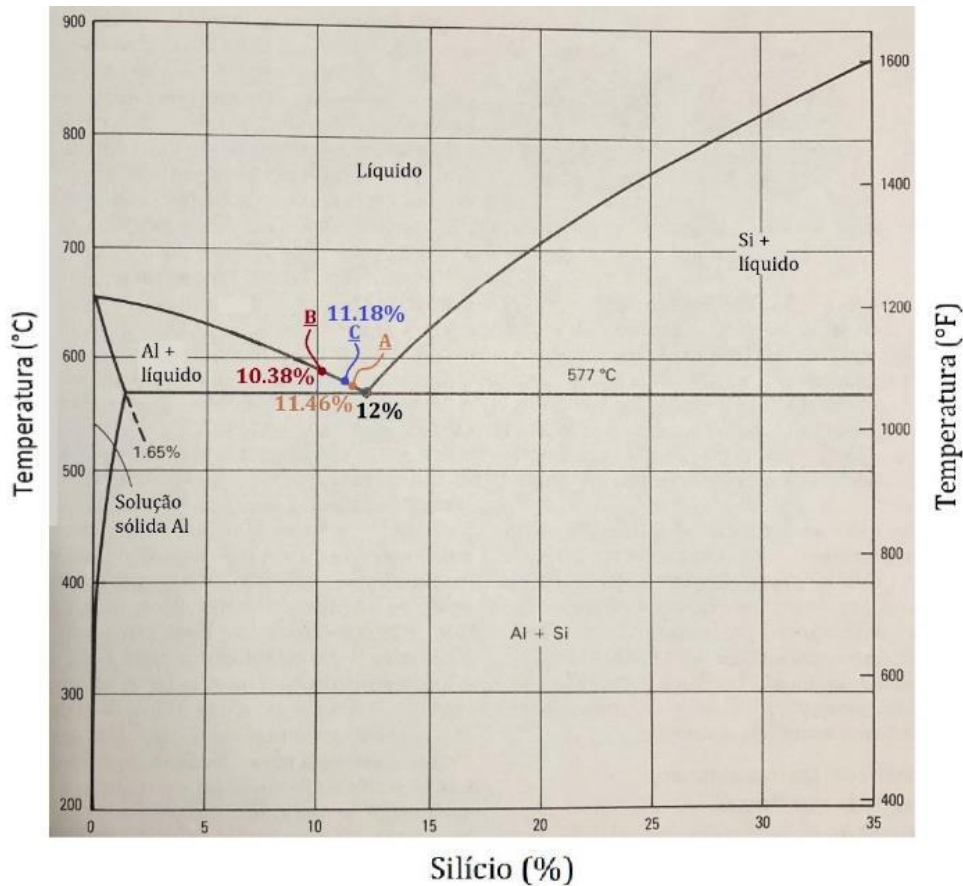
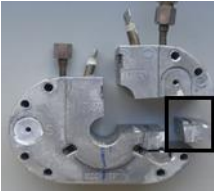








Figura 65 Diagrama de fases binário das ligas de alumínio-silício, com identificação das ligas obtidas para cada um dos termoblocos A, B e C, considerando, apenas, o efeito do silício [66].

O conhecimento da composição de cada liga é importante para compreender a microestrutura correspondente, a qual permite, a partir de vários parâmetros, inferir em relação às suas propriedades mecânicas.

Assim, preparou-se uma amostra para cada um dos termoblocos A e B e, para o termobloco C, foram preparadas duas amostras, sendo que uma contempla os tubos da água e a outra contempla a resistência, tal como é indicado na Tabela 3. Por fim, mediram-se as durezas de cada uma destas amostras, cujos resultados médios finais se encontram indicados na Tabela 3.

Tabela 3 Indicação das partes dos termoblocos A, B e C utilizados para preparar, respetivamente, as amostras A, B e C1 e C2. Também são apresentados os valores médios finais de dureza obtidos para cada amostra (arredondados às unidades), com uma carga aplicada de 20kg.

Termobloco A	Termobloco B	Termobloco C
		
Amostra A	Amostra B	Amostra C1 Amostra C2

				
Dureza [HV]	98	67	82	72

Por fim, selecionou-se um reagente, de entre a lista de reagentes mais indicados para as ligas de alumínio, existente em [70] e atacou-se a amostra. O reagente selecionado foi o *Keller's*. Uma vez que o *Keller's* atacou bem todas as amostras, não se achou necessário tentar um reagente diferente. A Tabela 21 do anexo D1 fornece informações relativas à composição química deste reagente e ao seu modo de aplicação.

As microestruturas apresentadas em seguida são obtidas com recurso a um microscópio ótico, tendo-se utilizado objetivas sucessivamente de maiores ampliações. Optou-se por apresentar, sobretudo, os resultados das objetivas de 5X, 20X e 50X, por serem as que permitem obter um conjunto interessante de informações, aliada uma qualidade de imagem (focagem) aceitável.

Considerem-se, então, as Figura 66 a) e b) e a Figura 67 correspondentes, respetivamente, às microestruturas das ligas dos termoblocos A, C e B, para uma objetiva de 5X. O objetivo destas figuras é, apenas, o de alertar para dimensão do problema da porosidade existente nos termoblocos que, para além de surgirem em grande quantidade, também são de dimensões consideráveis. Este fenómeno, já identificado na análise das macroestruturas, deve-se, no caso particular das ligas de alumínio, à provável retenção de gás - hidrogénio. As principais fontes de hidrogénio podem ser a atmosfera do forno, materiais reativos, fluxos, componentes externos e reações entre o metal e o molde [67].

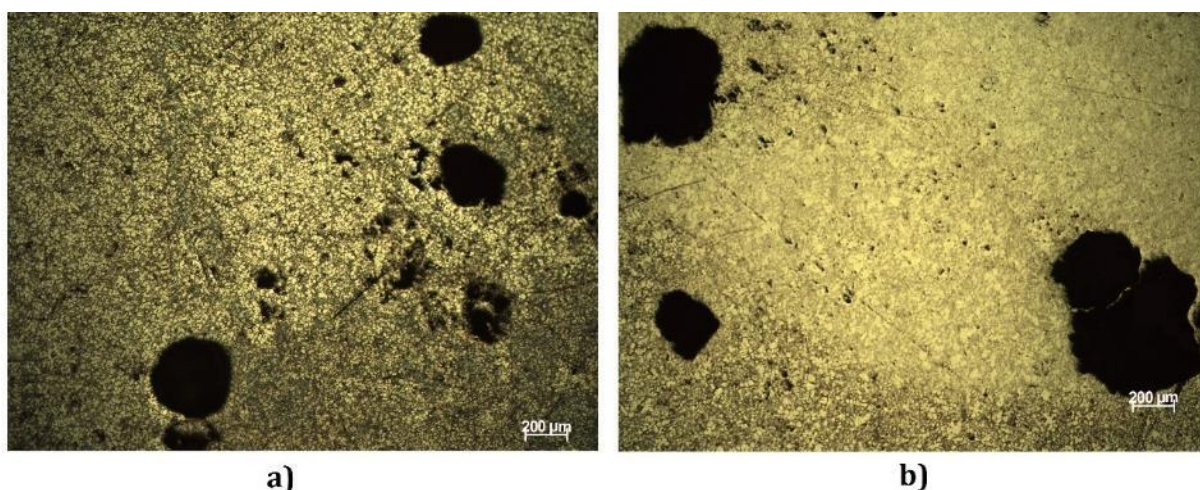


Figura 66 Microestruturas obtidas com o microscópio ótico, para os termoblocos A e C. Reagente: *Keller's*. Objetiva 5X; a) microestrutura da amostra A (termobloco A), verificando-se a existência de vários poros (cavidades de cor preta) cujas dimensões variam entre 400 e 500µm (0.4 a 0.5mm); b) microestrutura da amostra C2 (termobloco C), verificando-se a existência de vários poros (cavidades de cor preta) cujas dimensões vão até aos 900µm (0.9mm).

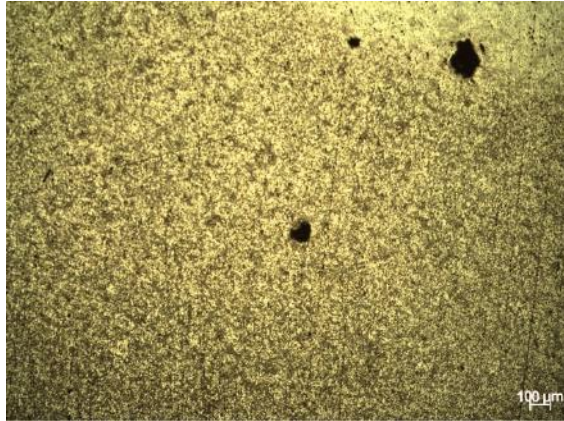


Figura 67 Microestrutura da amostra B (termobloco B), onde se verifica a existência de vários poros (cavidades de cor preta), sendo que os de maior dimensão rondam os $200\mu\text{m}$ (0.2mm). Reagente: *Keller's*. Objetiva 5X.

Em seguida, são apresentadas as microestruturas obtidas para cada uma das amostras, com as objetivas de 20X e 50X. Usando-se como referência algumas microestruturas presentes em [70], correspondentes a ligas com uma composição química semelhante às ligas em estudo, é possível caracterizá-las minimamente. Note-se, todavia, que o ataque químico e a objetiva utilizados são determinantes na definição das fases que são possíveis observar. Assim, uma caracterização detalhada das microestruturas requer um exame microscópico mais exigente, com um ataque químico mais cuidadoso, adequado à identificação de outras fases, e com maiores ampliações, que permitam a melhor caracterização de alguns pormenores.

Na Figura 68 a) e b) é possível observar a microestrutura da amostra A (termobloco A). Esta é a liga mais próxima do ponto eutético (Figura 65), com um teor de Si de 11.46%, seguindo-se o Cu com 1.38% (Tabela 2) e com uma dureza na amostra de 98HV (Tabela 3).

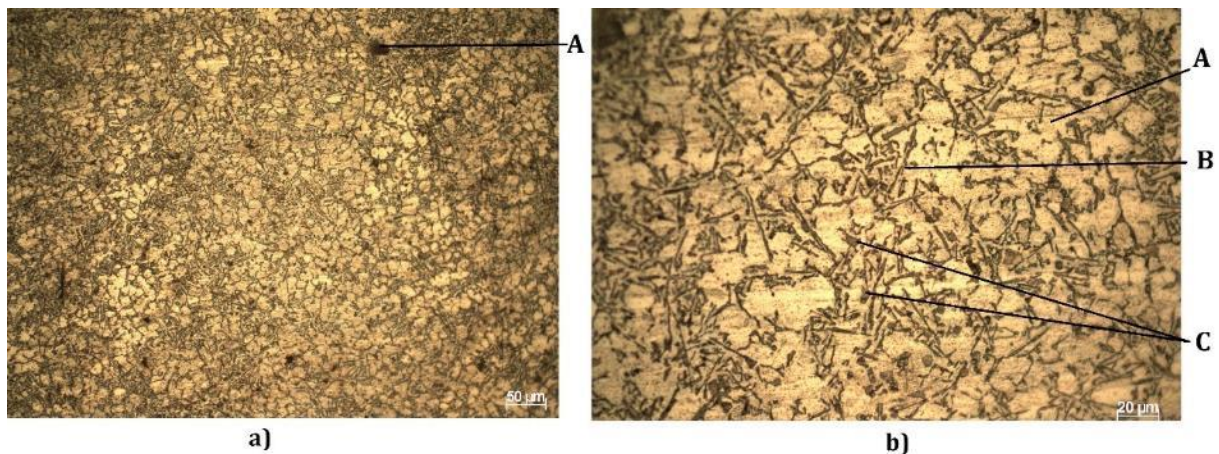


Figura 68 Microestruturas da liga presente na amostra A (termobloco A); a) destaque para o poro (A). Reagente: *Keller's*. Objetiva 20X; b) microestrutura típica de uma liga de fundição, constituída por dendrites de solução sólida de alumínio (A), com eutético de silício acicular (B) e, possivelmente, alguns cristais primários de silício (C). Reagente: *Keller's*. Objetiva 50X.

Na Figura 68 a), com uma objetiva de 20X, é possível identificar a existência de um poro (A). Para uma melhor identificação das fases é mais conveniente considerar a Figura 68 b), onde se encontra a microestrutura obtida com a objetiva de 50X.

Assim, tal como é característico das ligas Al-Si hipoeutéticas, esta microestrutura é constituída pela matriz de solução sólida de alumínio (A) e por cristais aciculares de eutético de

silício (B). Uma vez que se trata de uma liga praticamente eutética é possível que também existam alguns cristais de silício primários (C), embora estes só cresçam consideravelmente em ligas hipereutéticas. É provável que algumas das agulhas de maior dimensão, dispersas pela microestrutura, sejam FeSiAl . Porém, a objetiva de 50X não é suficiente para ser possível identificar, claramente, este composto. Como a liga apresenta um teor de Cu considerável, 1.38% (Tabela 2), é possível que existam partículas interdendríticas de CuAl_2 , embora não sejam visíveis com esta objetiva.

Na Figura 69 a) e b) é possível observar a microestrutura da amostra B (termobloco B). Esta é a liga mais afastada do ponto eutético (Figura 65), com um teor de Si de 10.38%, seguindo-se o Fe com 0.684% (Tabela 2) e com uma dureza na amostra de 67HV (Tabela 3).

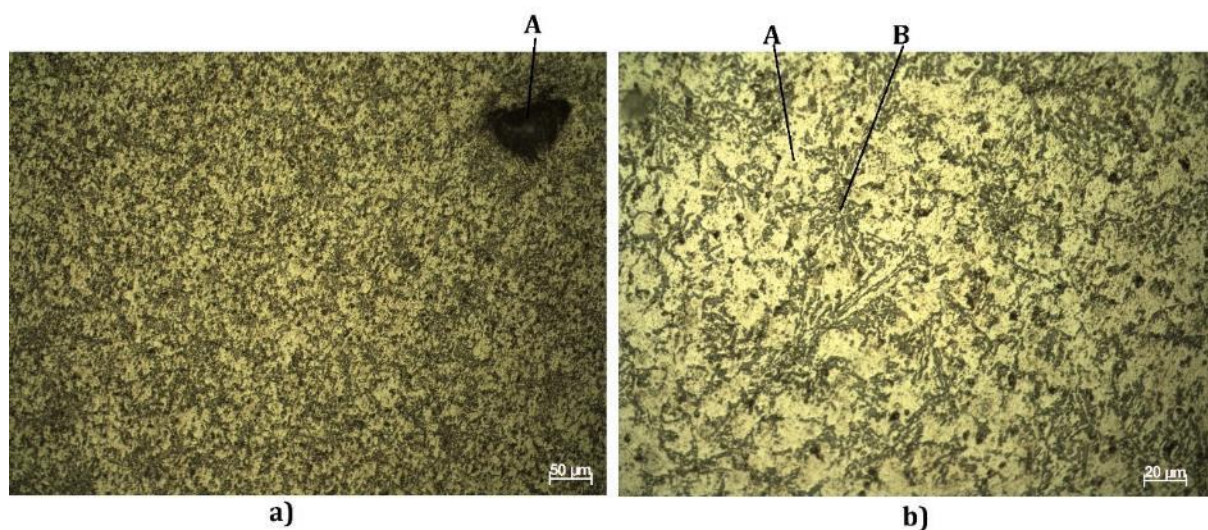


Figura 69 Microestruturas da liga presente na amostra B (termobloco B); a) destaque para o poro (A). Reagente: *Keller's*. Objetiva 20X; b) microestrutura típica de uma liga de fundição, constituída pela matriz de solução sólida de alumínio (A) com cristais aciculares de eutético de silício (B). Reagente: *Keller's*. Objetiva 50X.

Na Figura 69 a), com uma objetiva de 20X, observa-se a existência de um poro (A). Para uma melhor identificação das fases da microestrutura, considere-se a Figura 69 b).

Tal como é característico das ligas Al-Si hipoeutéticas, esta é constituída por cristais aciculares de eutético de silício (B), numa matriz de solução sólida de alumínio (A). No entanto, trata-se de uma microestrutura mais refinada do que a da Figura 68 b), correspondente ao termobloco A e das Figura 70 b) e Figura 71 b), correspondentes ao termobloco C. Isto pode estar relacionado com o facto de a peça em questão ter uma espessura mais fina (Figura 63) do que os outros termoblocos, ocorrendo uma solidificação mais rápida da liga, que se traduz em tamanhos de grão menores. Além disso, caso esta peça seja realmente obtida por fundição injetada, sabe-se que a liga solidifica sob pressões muito elevadas (aproximadamente 1000bar), pelo que a transferência de calor é muito mais eficiente, obtendo-se microestruturas mais refinadas. No entanto, a forma e o tamanho de grão formados são determinados, não só, pela taxa de solidificação, mas, também, pela composição da liga e pelos elementos adicionados (afinadores de grão). Geralmente, uma estrutura refinada é sempre desejável, pois promove a homogeneidade e integridade finais da peça fundida, minimiza a ocorrência de porosidade devida ao gás e melhora as propriedades mecânicas gerais da peça [67].

Existem, ainda, alguns pequenos pontos negros dispersos na microestrutura que, com uma objetiva de 50X, não se conseguem identificar com exatidão, podendo ser poros ou partículas

interdendríticas de Mg_2Si (o teor de Mg desta liga ronda os 0.414%) (Tabela 2). Também é possível que existam alguns cristais de silício primários, partículas interdendríticas de $CuAl_2$ e agulhas de $FeSiAl$, embora não sejam visíveis com esta objetiva.

Na Figura 70 a) e b) e na Figura 71 a) e b) é possível observar, respetivamente, as microestruturas das amostras C1 e C2 do termobloco C. Uma vez que a liga das duas amostras é a mesma, não se verificam diferenças significativas ao nível das respetivas microestruturas. Esta liga apresenta um teor de Si de 11.18%, seguindo-se o Cu com 1.66% (Tabela 2). As durezas nas amostras são de 82HV e 72HV para as amostras C1 e C2, respetivamente (Tabela 3).

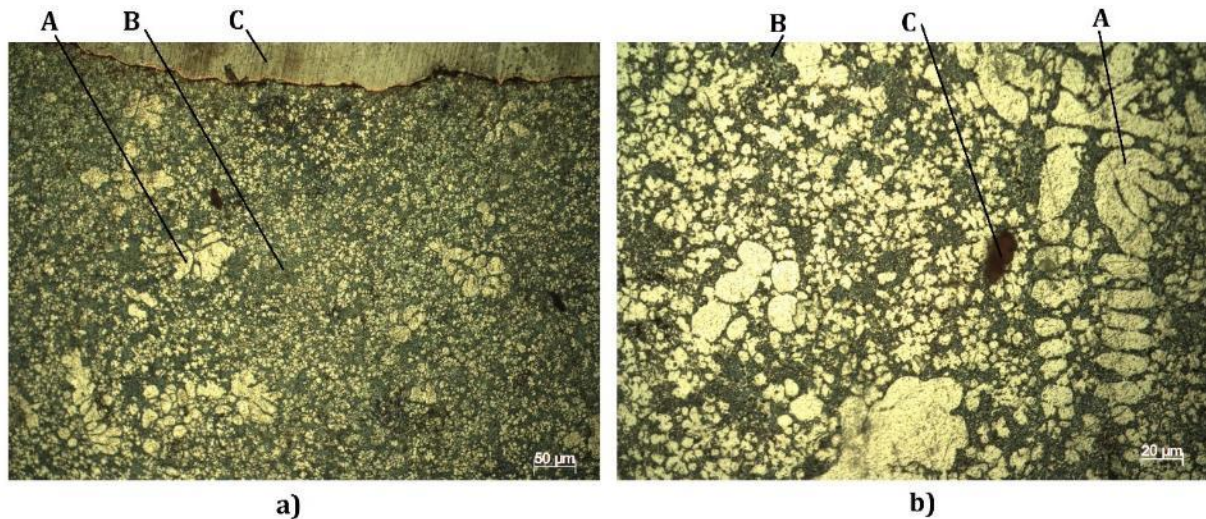


Figura 70 Microestruturas da liga presente na amostra C1 (termobloco C); a) microestrutura típica de uma liga de fundição com eutético de silício fibroso/globular (B) numa matriz dendrítica de alumínio (A), numa zona junto ao tubo da resistência (C). É possível que exista alguma porosidade (pontos negros). Reagente: *Keller's*. Objetiva 20X; b) microestrutura típica de uma liga de fundição, constituída pela matriz dendrítica de alumínio (A) e pelo eutético de silício fibroso/globular (B). O ponto (C) é, provavelmente, um poro. Reagente: *Keller's*. Objetiva 50X.

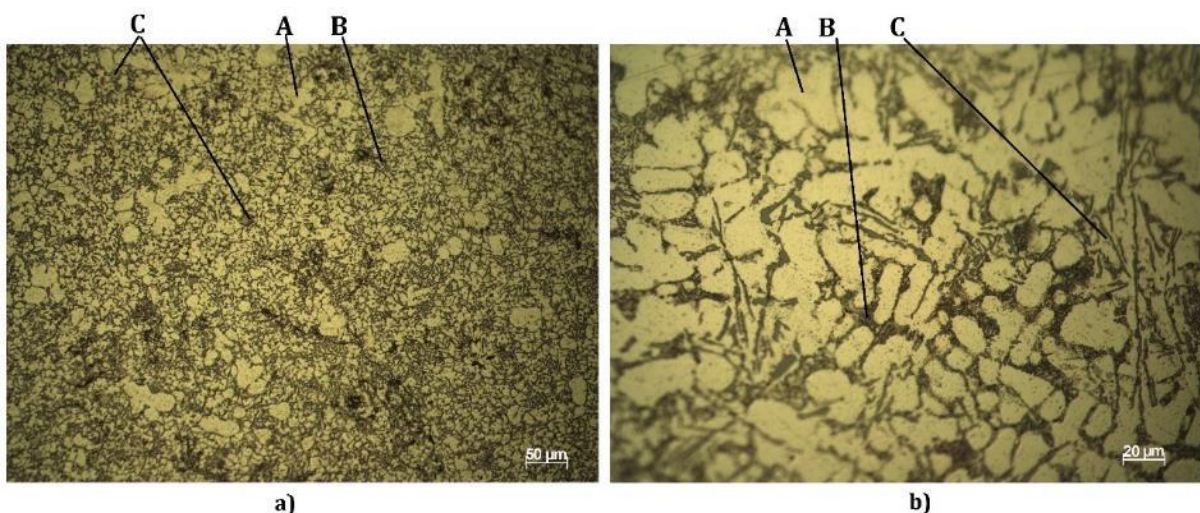


Figura 71 Microestruturas da liga presente na amostra C2 (termobloco C); a) microestrutura típica de uma liga de fundição com eutético de silício fibroso/globular (B) numa matriz dendrítica de alumínio (A). É possível que existam alguns cristais de silício primários (C). Reagente: *Keller's*. Objetiva 20X; b) microestrutura típica de uma liga de fundição, constituída pela matriz dendrítica de alumínio (A) e pelo eutético de silício fibroso/globular (B). As agulhas (C) são, muito provavelmente, $FeSiAl$. Reagente: *Keller's*. Objetiva 50X.

Em todas as microestruturas observa-se um eutético de silício fibroso/globular (B) numa matriz dendrítica de alumínio (A), sendo muito provável que também existam partículas interdendríticas de CuAl_2 , embora não sejam visíveis nestas imagens.

Na Figura 71 b) observa-se claramente que as células dendríticas (A) são mais desenvolvidas do que nos casos anteriores das Figura 68 b) e Figura 69 b). Como estas se desenvolvem durante a solidificação das ligas, então, a existência de dendrites maiores é um indicador da ocorrência de um arrefecimento mais lento da liga, o que, por sua vez, é um fator para o desenvolvimento de grão maiores. Os benefícios de obter estruturas refinadas são já bem conhecidos e têm vindo a ser referidos. Por outro lado, verifica-se que o eutético de silício nestas microestruturas é bastante fino, não apresentando o aspeto acicular dos casos anteriores, nas Figura 68 b) e Figura 69 b).

Na Figura 70 b) observa-se a existência de um poro (C) e na Figura 71 b) é provável que algumas das agulhas (C) de maior dimensão, sejam agulhas de FeSiAl , embora não seja possível identificá-las, com precisão, com a objetiva de 50X. Na Figura 71 a) também se observam alguns cristais de silício primários (C).

Para uma melhor observação destes cristais considere-se a Figura 72, onde estes estão representados com a sigla (D).

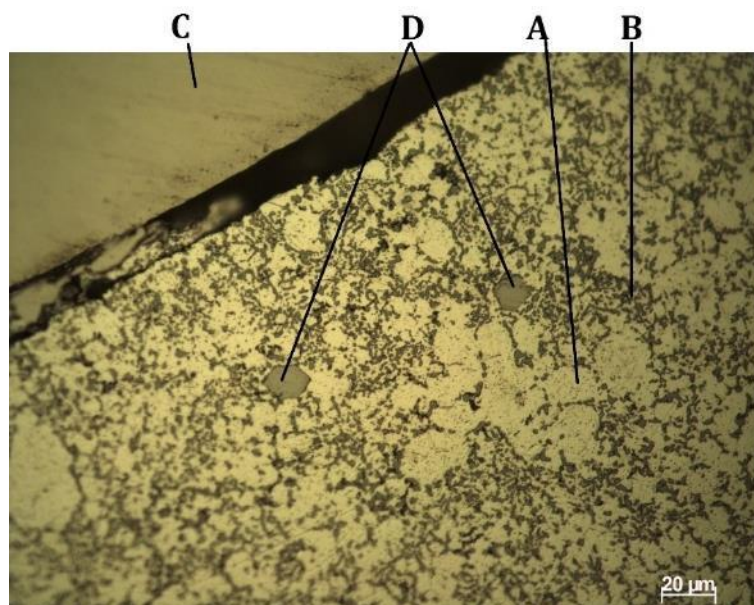


Figura 72 Microestrutura da amostra C2 (termobloco C) junto ao tubo da água (C), com eutético de silício fibroso (B) numa matriz dendrítica de alumínio (A), sendo visíveis dois cristais de silício primário (D). Reagente: *Keller's*. Objetiva 50X.

Para caracterizar os materiais dos tubos da água e da resistência, existentes nos termoblocos A e C, determinaram-se as suas composições químicas com recurso ao espectrómetro. No entanto, a reduzida dimensão destes tubos impossibilita a utilização direta do feixe de elétrons nos mesmos, pelo que foi necessário modificar a sua forma e espalmá-los para se obter uma área suficiente para a análise.

Os resultados da composição química dos tubos da água e da resistência podem ser consultados na Tabela 4, na qual também já é indicada a composição química de uma liga normalizada, com uma composição bastante semelhante às obtidas (AISI 304) [71].

Tabela 4 Composição química dos tubos da água e da resistência e da liga AISI 304 [71].

		Liga	Composição química (%)								
			Fe	Cr	Ni	Mn	Si	C	P	S	Residual
Tubo da água	Obtido		72	18.36	7.64	0.97	0.3	0.066	0.037	0.016	0.611
Tubo da resistência	Obtido		71.7	18.36	7.68	1.25	0.35	0.059	0.033	0.018	0.55
		AISI304 Restante	17.5-19.5	8-10.5	≤2	≤1	≤0.07	≤0.045	≤0.03	-	

Tendo em consideração os resultados obtidos, conclui-se que ambos os tubos são constituídos por aços inoxidáveis, o que se justifica pela sua boa resistência à corrosão. Informações adicionais em relação à liga AISI 304 podem ser encontradas em [71]. As medições de dureza efetuadas nos tubos, com uma carga de 100g, indicam que os tubos de água têm uma dureza média de 303HV e que os tubos da resistência têm uma dureza média de 144HV.

4.3.1.1 Reflexão sobre os resultados

Em suma, o estudo metalográfico desenvolvido permite concluir que não existem, do ponto de vista da composição química de cada liga, diferenças suficientemente significativas para influenciar de forma determinante o desempenho final de cada termobloco. Assim, pode-se afirmar que as ligas existentes nas três soluções em estudo são bastante semelhantes entre si.

Já o *design* e a solução construtiva adotados para cada termobloco revelam-se determinantes para maior ou menor formação de defeitos no fundido. Por exemplo, o facto de o termobloco B possuir uma espessura mais fina, traduz-se numa taxa de arrefecimento mais elevada e, conseqüentemente, numa estrutura mais refinada. Também o facto dos termoblocos A e C possuírem tubos nos seus interiores, pode intensificar a solubilidade do hidrogénio no metal fundido, o que promove a formação de poros.

De facto, a existência de porosidade é um defeito de fundição claramente presente em todas as soluções. Esta pode influenciar a eficiência térmica dos termoblocos, para além de poder afetar a resistência mecânica do termobloco.

De um modo geral, as ligas de Al-Si exibem uma combinação de características interessantes, como a fluidez, boa resistência à corrosão, maquinabilidade, soldabilidade e resistência ao desgaste. Estas características, aliadas ao baixo coeficiente de dilatação e baixa contração na solidificação das ligas Al-Si minimizam os inconvenientes relativos à alimentação e à fissuração das peças fundidas, o que justifica a boa adaptação destas ligas ao processo de fundição. O facto de possuírem boa condutividade térmica, resistência à corrosão e retenção de calor e uma capacidade térmica mássica reduzida levam a que as ligas Al-Si sejam adequadas à aplicação final em termoblocos, onde se pretende um aquecimento rápido do seu bloco metal e onde as solicitações são sobretudo térmicas.

Com as ligas caracterizadas do ponto de vista metalográfico, torna-se importante, não só, inferir acerca da possibilidade de utilizar outras ligas de fundição, que não de Al-Si, como, também, avaliar o impacto da modificação do seu *design* na forma como se dá o aquecimento. Em trabalhos futuros podem estudar-se outras soluções que sejam viáveis do ponto de vista funcional e do ponto de vista económico, tendo-se sempre em consideração as limitações impostas pelo processo de fundição.

4.3.2 Base metálica de suporte do grupo

Nesta secção é apresentada e analisada a base metálica de suporte do grupo. Esta é responsável por alojar a maioria dos componentes do grupo na sua cavidade, estando fixa ao termobloco e à máquina, através de um conjunto de parafusos. Como está em contacto direto com o termobloco, deve ser capaz de suportar elevadas temperaturas e, uma vez que água passa nos componentes no seu interior, deve também resistir à corrosão.

Nas Figura 73 a) e b) observam-se, respetivamente, o interior e o exterior da base. A existência de marcas de extratores na zona interior é um indicador de que a peça é obtida por fundição. Também se verifica a existência de uma região polida, no lado exterior da cavidade, que é possivelmente um revestimento de níquel utilizado, por norma, para proteger as peças contra a corrosão.

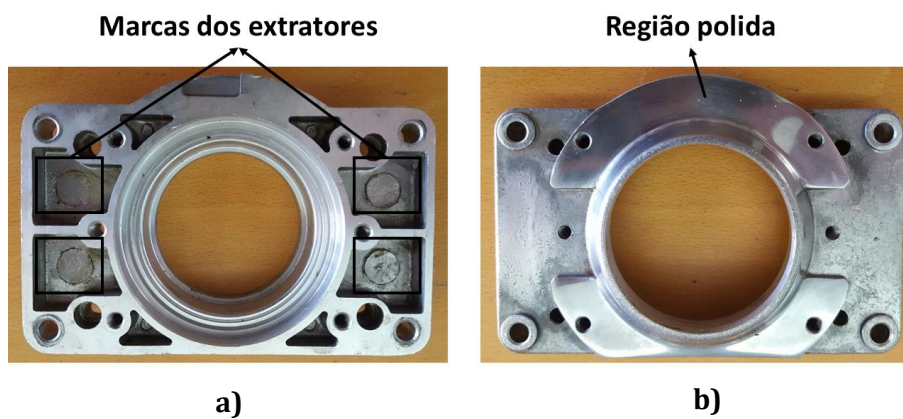


Figura 73 Apresentação da base metálica de suporte do grupo; a) vista do interior da base, com referência para a existência de marcas de extratores; b) vista do exterior da base, com indicação da região polida.

Para a obtenção de amostras para análise, seccionou-se a base de acordo com o representado na Figura 74 a). Observando-se a Figura 74 b) verifica-se que não existem heterogeneidades significativas na sua macroestrutura.

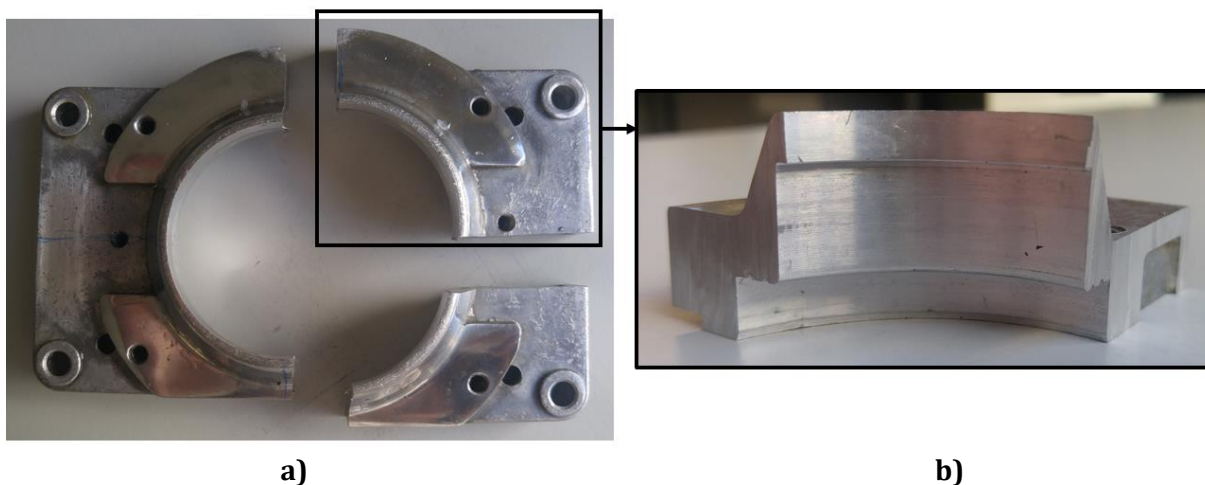


Figura 74 Base metálica de suporte seccionada; a) identificação dos planos de corte definidos na base; b) macroestrutura da base.

Em seguida, determinou-se a massa volúmica da base e mediu-se a sua dureza superficial (Tabela 5).

Tabela 5 Massa volúmica da base (arredondado às centésimas) e dureza média superficial (arredondado às unidades), com uma carga de 20kg.

Massa volúmica [g/cm³]	2.59
Dureza superficial média [HV]	107

Posto isto, determinou-se a composição química com recurso a um espectrómetro. Na Tabela 6 encontram-se os resultados obtidos da espectrometria, juntamente com a liga registada pela *Aluminum Association* que possui uma composição química mais próxima da liga em estudo (A339). Os resultados permitem concluir que se trata de uma liga Al-Si hipoeutética, com 11.13% de Si.

Tabela 6 Composição química da liga da base e da liga A339 (a) P, *permanent mold casting* (fundição em coquilha) [67].

		Liga; produto (a)	Composição química (%)							
			Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Residual
Base metálica de suporte	Obtido		85.7	11.13	0.573	1.72	0.0624	0.0810	0.521	0.2126
		A339; P	-	11-13	1.2	1.5-3.0	0.5	0.5-1.5	1	-

Em seguida, preparou-se uma amostra para microscopia ótica (Figura 75) e determinou-se a sua dureza média, com uma carga de 20kg, obtendo-se o valor de 94HV.



Figura 75 Amostra da base metálica de suporte do grupo.

Dada a similaridade desta liga com as ligas dos termoblocos, foi selecionado o reagente *Keller's*. A Tabela 21, do anexo D1 fornece informações adicionais relativamente a este reagente. As microestruturas obtidas encontram-se na Figura 76 a) e b).

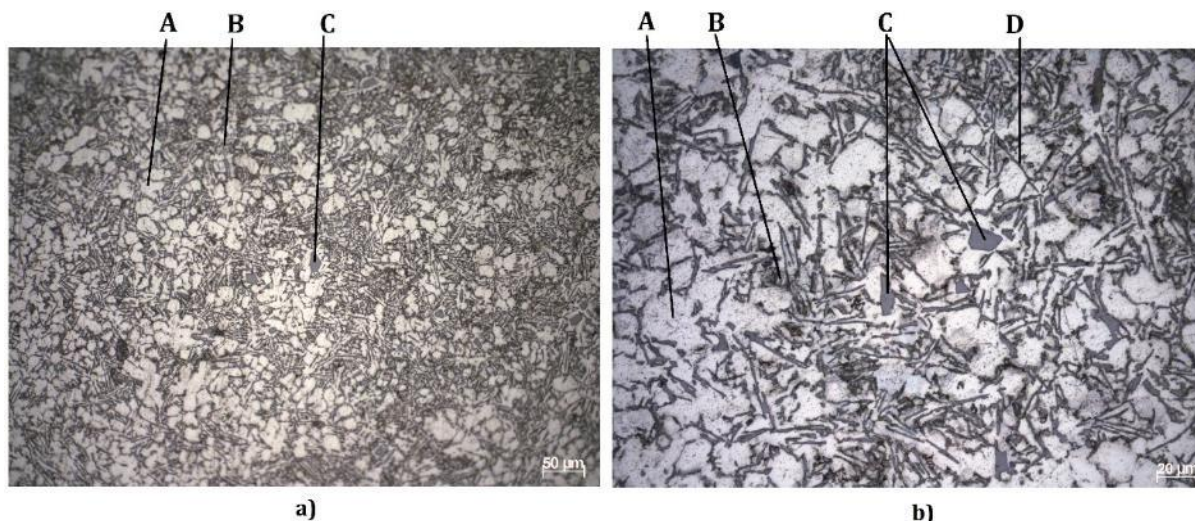


Figura 76 Microestruturas da liga presente na amostra da base metálica de suporte do grupo; a) microestrutura típica de uma liga para fundição com eutético de silício acicular (B) numa matriz dendrítica de alumínio (A) e com cristais primários de silício (C). Reagente: *Keller's*. Objetiva 20X; b) microestrutura típica de uma liga de fundição, constituída por dendrites de solução sólida de alumínio (A), com eutético de silício acicular (B) e, possivelmente, alguns cristais primários de silício (C). Também se observam várias agulhas que podem ser agulhas de FeSiAl (D). Reagente: *Keller's*. Objetiva 50X.

Assim, tal como é característico das ligas Al-Si hipoeutéticas, as microestruturas das Figura 76 a) e b) são constituídas pela matriz de solução sólida de alumínio (A) e por cristais aciculares de eutético de silício (B). Uma vez que se trata de uma liga praticamente eutética é possível que também existam alguns cristais de silício primários (C).

Na Figura 76 b) conseguem-se identificar algumas agulhas de maior dimensão, dispersas pela microestrutura, que é provável que sejam agulhas de FeSiAl (D). Porém, a objetiva de 50X não é suficiente para identificar claramente este composto. Como a liga apresenta um teor de Cu considerável, 1.72% (Tabela 6), é possível que existam partículas interdendríticas de CuAl_2 , embora não sejam visíveis com esta objetiva.

4.3.3 Êmbolo da cápsula e aro de suporte da mola

Em seguida segue-se a apresentação e análise do êmbolo da cápsula (Figura 77 a). Tal como indicado na Figura 55, o êmbolo aloja as peças roscadas e a válvula de retenção de calor no seu interior e é responsável por fixar e comprimir a cápsula. Como a água passa no seu interior, esta peça deve oferecer uma boa resistência à corrosão.

Tal como nos casos anteriores, o êmbolo foi seccionado (Figura 77 b) e preparado para análise microscópica (Figura 77 c).

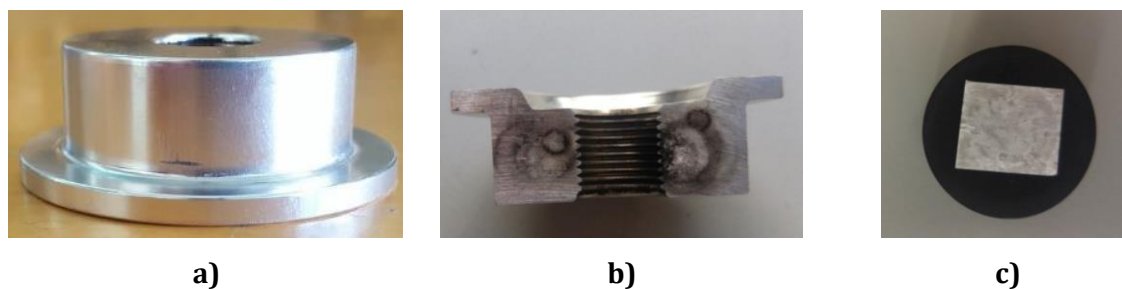


Figura 77 Apresentação do êmbolo da cápsula; a) êmbolo da cápsula, antes da análise; b) êmbolo seccionado para análise; c) amostra para análise microscópica.

A

Tabela 7 indica os valores de massa volúmica e a dureza obtidos.

Tabela 7 Massa volúmica do êmbolo da cápsula (arredondado às centésimas) e durezas médias da superfície e da amostra (arredondadas às unidades), com uma carga de 20kg.

Massa volúmica [g/cm³]	2.67
Dureza superficial média [HV]	124
Dureza média da amostra [HV]	120

Neste caso em particular, como não se tinha o conhecimento prévio da composição química da liga, a seleção do reagente para atacar a amostra foi efetuada tendo em consideração, apenas, os valores da massa volúmica e da dureza obtidos. Estes indicam que, muito provavelmente, se trata de uma liga de alumínio, embora a dureza superficial seja um pouco mais elevada em relação à registada nas ligas Al-Si anteriores. Assim, tal como nos casos anteriores, tentou-se a utilização do reagente *Keller's*. Como este não provocou qualquer efeito na amostra, recorreu-se, de novo, ao [70] e utilizaram-se, em seguida, os reagentes *Poulton's* e *HF (0.2%)*, obtendo-se as microestruturas da Figura 78 a) e b) e da Figura 79 a) e b), respetivamente. Algumas informações adicionais sobre estes reagentes podem ser encontradas na Tabela 21, do anexo D1.

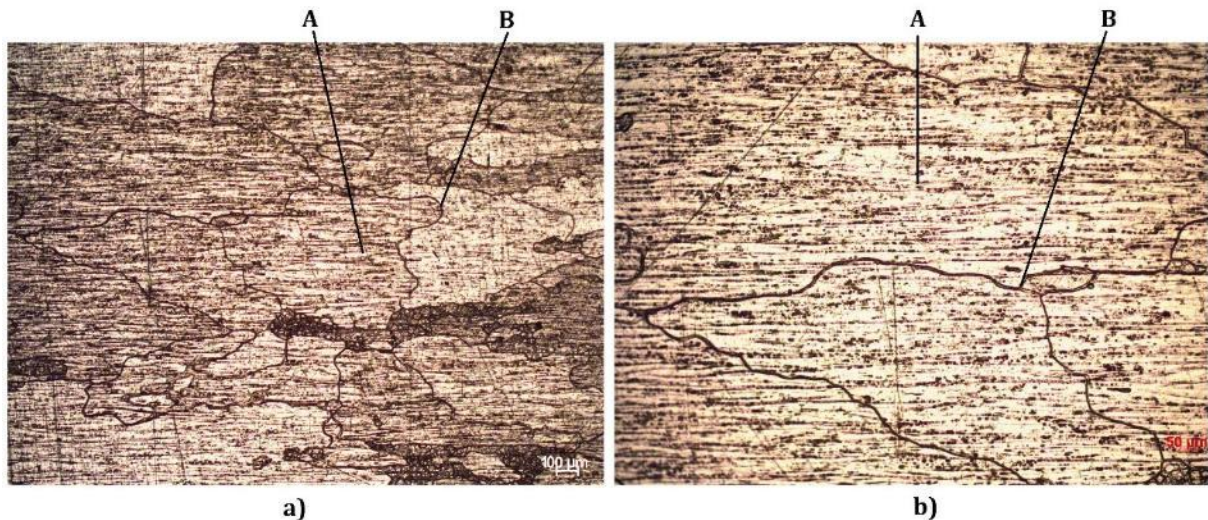


Figura 78 Microestruturas da amostra do êmbolo, sendo visível vários cristais de solução sólida de alumínio (A), com grandes dimensões, orientados na direção da extrusão. (B) indica as fronteiras de grão. Reagente: *Poulton's*; a) objetiva de 5X; b) objetiva de 10X.

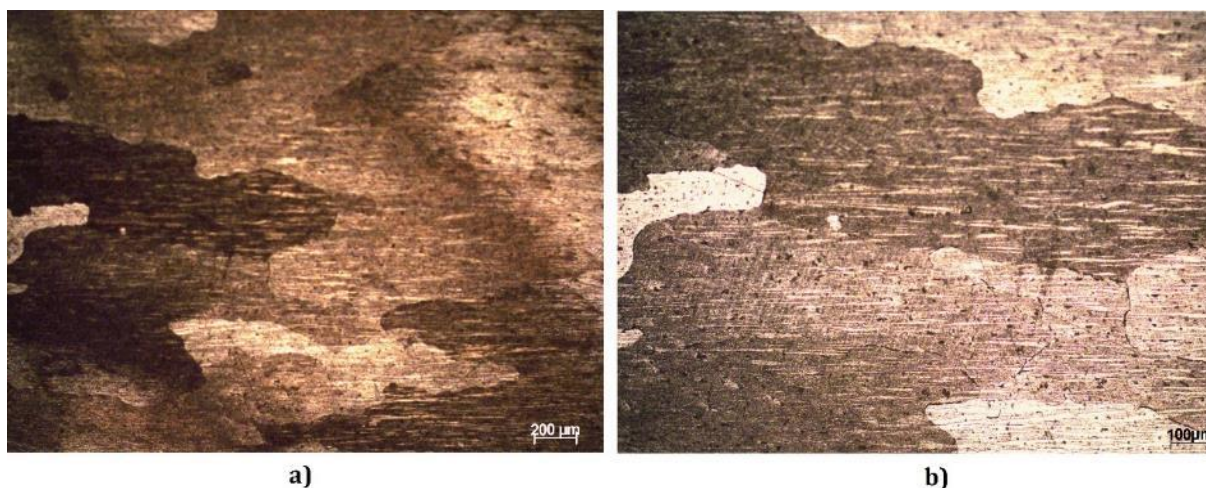


Figura 79 Microestruturas da amostra do êmbolo, sendo visível vários cristais de solução sólida de alumínio, com grandes dimensões, orientados na direção da extrusão. Reagente: HF (0.2%); a) objetiva de 5X; b) objetiva de 10X.

Nas microestruturas anteriores são visíveis cristais de solução sólida de alumínio (α), verificando-se, claramente, que são bastante semelhantes para os dois reagentes, embora, com o HF, os cristais de Al tenham adquirido uma certa coloração. Consta-se, ainda, que as microestruturas são consideravelmente diferentes das obtidas nas peças constituídas por ligas de Al-Si, o que indica que a sua composição química é distinta.

Os posteriores resultados da composição química revelam que se trata de uma liga com um teor de 97.9% de Al, 1.02% de Mg e 0.644% de Si. Recorrendo a [72], onde existe um conjunto de ligas registadas pela *Aluminum Association*, é possível identificar a liga registada com a composição química mais próxima da obtida. Na Tabela 8 encontram-se os resultados obtidos na estequiometria e a correspondente liga registada.

Tabela 8 Composição química da liga do êmbolo e indicação da liga registada com a composição química mais próxima [72].

		Liga	Composição química (%)						
			Al	Mg	Si	Cu	Fe	Cr	Residual
Êmbolo da cápsula	Obtido		97.9	1.02	0.644	0.204	0.117	0.0578	0.0572
	6061 T6	95.8-98.61	0.8-1.2	0.4-0.8	0.15-0.4	0-0.7	0.0-0.25	-	

As ligas de alumínio 6061 são ligas com resistência média-alta e com muito boa resistência à corrosão e boa soldabilidade. São ligas obtidas por extrusão e tratadas termicamente, sendo que, normalmente, é utilizado o tratamento com a designação T6, correspondente ao tratamento térmico com envelhecimento artificial. Apesar de possuírem um elevado teor de Al, não podem ser consideradas ligas de alumínio puro, pois a adição combinada de Mg e Si, ainda que em teores relativamente reduzidos, é suficiente para lhes conferir uma resistência bastante superior à encontrada nas ligas de alumínio puro [72]. Na Tabela 9 é possível comparar as propriedades mecânicas de uma liga de alumínio puro comum (1050) com a liga 6061 T6. Para os valores desta tabela, a liga 1050 está no estado H14, que corresponde a um tratamento corrente nesta liga [73][74].

Tabela 9 Propriedades mecânicas de uma liga de alumínio puro tratada (1015 H14) e da liga de alumínio 6061 tratada (6061 T6) [73][74]; (a) os valores de dureza em Vickers [HV] são aproximados a partir dos valores de Brinell [HB] e resultam da consulta da tabela de conversões para ligas de alumínio disponível em [75].

	Liga 1050 H14	Liga 6061 T6
$\sigma_{0,2}$ [MPa]	85	240-276
σ_r [MPa]	105-145	260-310
Dureza [HB/HV(a)]	34/50(a)	95-96/111-115(a)
ε (%)	12	9-13

Na Tabela 10 encontram-se os valores das propriedades físicas da liga 6061 T6.

Tabela 10 Valores das propriedades físicas da liga 6061 T6 [74].

Massa volúmica [g/cm³]	2.70
Ponto de fusão [°C]	580
Coefficiente de expansão térmica [m/m·°C]	23.5×10 ⁻⁶
Módulo de Elasticidade [GPa]	70-80
Condutividade térmica [W/m·K]	173
Resistividade elétrica [Ω·m]	0.037-0.040×10 ⁻⁶

Em seguida segue-se a análise do aro de suporte da mola, no qual assenta a mola. Tal como o êmbolo, também o aro deve resistir à corrosão, pois está em contacto com a água. Este foi seccionado tal como representado na Figura 80 a), sendo que não se observam heterogeneidades significativas na análise da sua macroestrutura. Na Figura 80 b) está representada a amostra que foi preparada para analisar ao microscópio.



Figura 80 Aro metálico seccionado e respetiva amostra; a) aro seccionado; b) amostra para analisar ao microscópio.

A massa volúmica e a dureza média da superfície e da amostra encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 Massa volúmica do aro (arredondado às centésimas) e durezas médias da superfície e da amostra (arredondadas às unidades), com uma carga de 20kg.

Massa volúmica [g/cm³]	2.64
Dureza superficial média [HV]	106

Dureza média da amostra [HV]

105

Tendo em consideração os resultados anteriores e o facto do reagente *Keller's* não ter atacado a amostra do aro, optou-se por utilizar o reagente *Poulton's*, tal como se havia feito anteriormente, pela similaridade entre o aspeto exterior do aro e do êmbolo. No entanto, também se poderia ter utilizado o *HF*. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 81 a) e Figura 81 b).



Figura 81 Microestruturas da amostra do aro, sendo visível vários cristais de solução sólida de alumínio, com grandes dimensões, orientados na direção da extrusão. Reagente: *Poulton's*; a) objetiva de 5X; b) objetiva de 10X.

A microestrutura é bastante idêntica à da Figura 78 e, por isso, conclui-se que a liga presente no aro é muito semelhante à do êmbolo, observando-se, uma vez mais, cristais de solução sólida de alumínio. A posterior determinação da composição química da liga, vem confirmar esta semelhança (Tabela 8 e Tabela 12).

Dada a dimensão reduzida da secção do aro, foi necessário proceder à alteração da sua forma, por via destrutiva, para ser possível recorrer à espectrometria. Os resultados da espectrometria permitem concluir que se trata de uma liga com 97.8% de Al, 0.892% de Mg e 0.662% de Si, sendo, por isso, muito semelhante à composição da liga obtida no êmbolo. Na Tabela 12 encontram-se os resultados obtidos com indicação da liga registada mais parecida.

Tabela 12 Composição química da liga do aro da suporte da mola e indicação da liga registada com a composição química mais próxima [72].

		Liga	Composição química (%)						
			Al	Mg	Si	Cu	Fe	Zn	Residual
Aro de suporte da mola	Obtido		97.8	0.892	0.662	0.248	0,228	0.0346	0.1354
	6061 T6		95.8-98.61	0.8-1.2	0.4-0.8	0.15-0.4	0-0.7	0.0-0.25	-

4.3.4 Placa permutadora de calor e peças roscadas

A placa é responsável por manter quentes o grupo e a água, aquecendo por transferências de calor com o termobloco. Assim, é de interesse que esta seja constituída por um material bom

condutor de calor e, também, resistente à corrosão, já que a água passa no seu interior, acumulando por baixo da sua forma em disco.

Na Figura 82 a) observa-se a placa permutadora de calor vista da zona superior. Note-se a existência de uma rugosidade superficial acentuada, o que é indicador de que a peça é possivelmente obtida por fundição. Na Figura 82 b) observa-se a parte inferior da placa, sendo visível algum calcário e alguma corrosão devido ao contacto com a água (A).



Figura 82 Placa permutadora de calor; a) placa permutadora de calor vista da parte superior; b) parte inferior da placa permutadora de calor com destaque para a presença de algum calcário e corrosão (A).

A placa foi seccionada de acordo com a Figura 83 a) para se obterem amostras para análise. Na Figura 83 b) verifica-se que não existem heterogeneidades superficiais significativas.

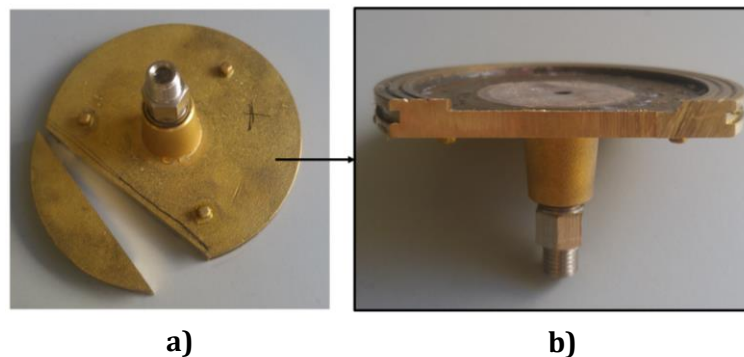


Figura 83 Placa permutadora de calor seccionada; a) identificação do plano de corte efetuado na placa; b) macroestrutura da placa.

Em seguida, determinou-se a massa volúmica da placa, tendo-se obtido um valor de 8.12 g/cm^3 . Uma vez que a placa apresenta uma rugosidade superficial considerável, não foi possível medir a sua dureza superficial. No entanto, a dureza da amostra (Figura 84) foi determinada posteriormente, tendo-se obtido um valor médio de 92 HV, com uma carga de 20kg.

Na Tabela 13 encontram-se os resultados obtidos da análise da composição química da placa, bem como a liga UNS (*Unified Numbering System*), para ligas de cobre, com a composição química mais próxima desta. A seleção da liga registada foi efetuada com recurso a [76].

Tabela 13 Composição química da placa permutadora de calor e da UNS n°C87900 [76].

		Liga	Composição química (%)						
			Cu	Zn	Al	As	Sn	Pb	Residual
Placa permutadora de calor	Obtido		62.28	37.68	0.0092	0.0053	0.0044	0.0035	0.0176
	<i>C87900</i>		65	34	-

Trata-se de uma liga cobre-zinco, com um teor de Cu de 62.28% e um teor de Zn de 37.68% que, de acordo com a UNS, pertence à categoria dos latões amarelos, que se caracterizam pela elevada condutibilidade térmica. De acordo com [76], estas ligas perdem zinco por vaporização em temperaturas relativamente próximas ao do ponto de fusão, pelo que é adicionada uma pequena quantidade de alumínio para melhorar a fluidez e manter a vaporização do zinco no mínimo. Destaques, ainda, para o reduzido teor em chumbo (0.0035%).

Em seguida, preparou-se uma amostra para observar no microscópio ótico, tal como indicado Figura 84.



Figura 84 Amostra da placa permutadora de calor.

Para seleccionar o reagente consultou-se a lista dos reagentes mais indicados para as ligas de cobre, existente em [77] e atacou-se a amostra. O reagente seleccionado é o indicado na Tabela 22 do anexo D2, sendo que não existe indicação relativa à sua designação.

As microestruturas obtidas no microscópio ótico encontram-se na Figura 85 a) e b), tratando-se de uma microestrutura típica de um latão (60-40), com a fase β (zinco), de cor escura e a fase α (cobre), de cor clara.

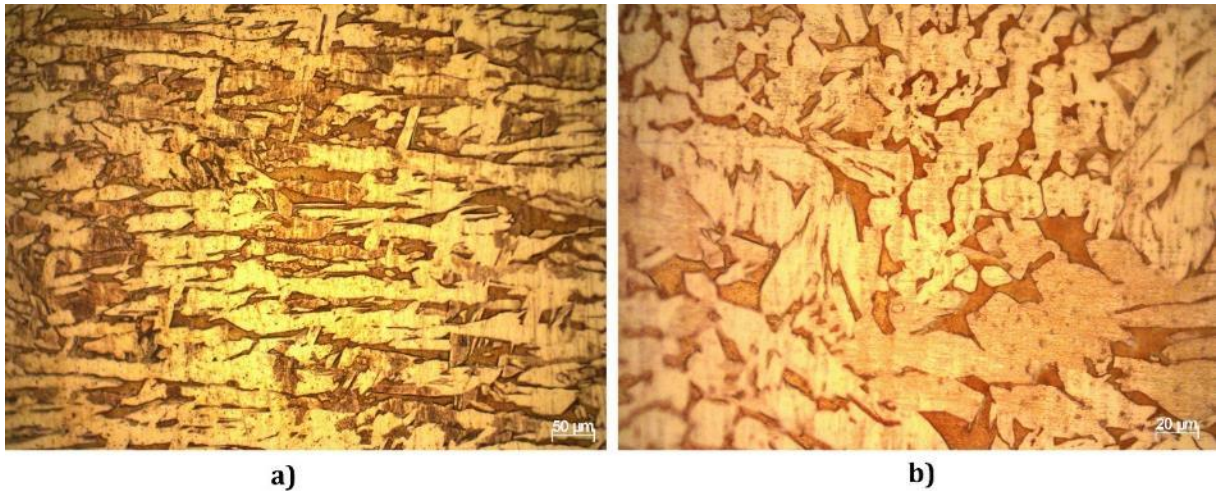


Figura 85 Microestruturas obtidas na amostra da placa permutadora de calor. Microestrutura típica de um latão (60-40) constituído pela fase β (cor escura) e fase α (cor clara). Reagente: Tabela 22 do anexo D2; a) objetiva 20X; b) objetiva 50X.

Em seguida faz-se a análise das peças roscadas grande e pequena. Estas alojam a válvula de retenção simples no seu interior e estão roscadas ao êmbolo da cápsula (Figura 55), sendo importante que sejam resistentes à corrosão. Na Figura 86 a) e b) observa-se a peça roscada grande e, na Figura 86 c) e d), observa-se a peça roscada pequena. Estas peças têm um aspeto metálico no exterior e são, à partida, torneadas e fresadas.

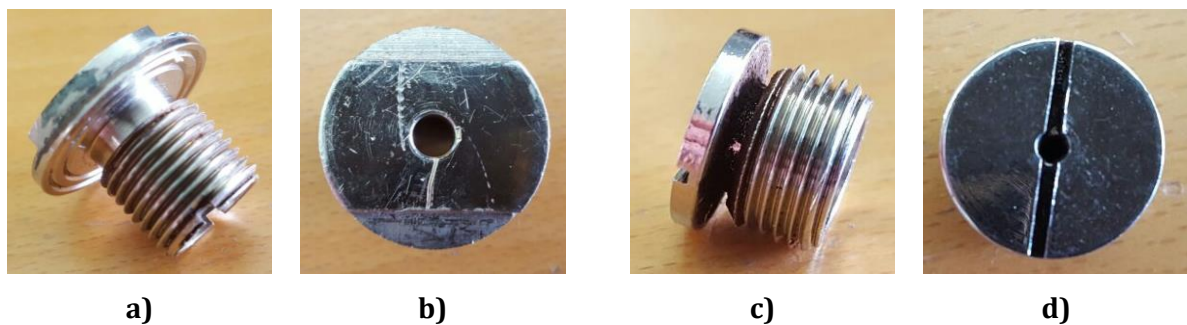


Figura 86 Apresentação da peça roscada grande (à direita) e da peça roscada pequena (à esquerda); a) exterior da peça roscada grande; b) topo da peça roscada grande; c) exterior da peça roscada pequena; d) topo da peça roscada pequena.

Na Figura 87 a) e na Figura 87 b) é possível observar os cortes efetuados em cada uma das peças roscadas para se prepararem as amostras para análise. Verifica-se, de imediato, que o interior destas peças apresenta um aspeto amarelado, bastante diferente do seu aspeto exterior metálico, o que indica que possuem um revestimento superficial.

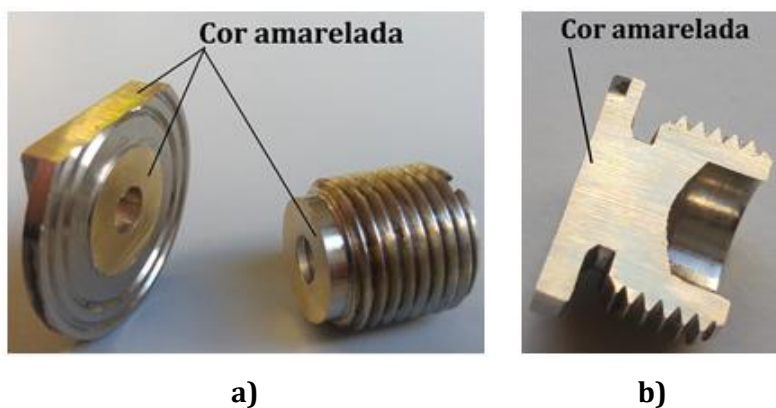


Figura 87 Cortes efetuados nas peças roscadas com destaque para a cor amarelada interior; a) peça roscada; b) peça roscada pequena.

Em seguida, determinaram-se a massa volúmica de cada rosca e mediram-se as suas durezas médias. Uma vez que houve alguma dificuldade em medir a dureza superficial na peça roscada pequena, não só pela sua reduzida dimensão, mas, também, por não permitir um apoio estável, só se efetuou a medição de dureza superficial para a peça roscada grande. No entanto, foram efetuadas, posteriormente, medições de dureza em todas amostras Figura 88. Os resultados obtidos para as massas volúmicas e para as durezas encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 Massa volúmica de cada uma das peças roscadas (arredondados às centésimas) e durezas médias da superfície e da amostra (arredondadas às unidades), com uma carga de 20kg.

	Peça roscada grande	Peça roscada pequena
Massa volúmica [g/cm³]	8.14	7.55
Dureza superficial média [HV]	109	-
Dureza média da amostra [HV]	117	97

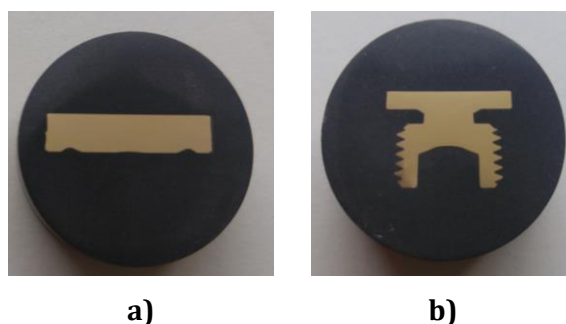


Figura 88 Amostras das peças roscadas; a) amostra da peça roscada grande; b) amostra da peça roscada pequena.

Na Tabela 15 encontram-se os resultados obtidos da análise da composição química da placa, bem como a liga UNS (*Unified Numbering System*), para ligas de cobre, com a composição química mais próxima desta. A seleção da liga registada foi efetuada com recurso a [76].

Tabela 15 Composição química das peças roscadas e da UNS nºC86400 [76].

		Liga	Composição química (%)						
			Cu	Zn	Pb	Fe	Sn	Ni	Residual
Peça roscada grande	Obtido		56.62	40.52	2.24	0.268	0.221	0.0832	0.0478
		C86400	58	38	1	1	1	...	-
Peça roscada pequena	Obtido		58.54	38.92	1.98	0.153	0.207	0.138	0.0620
		C86400	58	38	1	1	1	...	-

Trata-se de uma liga cobre-zinco, ligeiramente diferentes da liga obtida para a placa permutadora de calor, pelo facto de possuírem quantidades de chumbo significativas, na ordem dos 2%. O chumbo facilita a maquinabilidade da peça, melhora a sua resistência ao desgaste e possui propriedades antifricção. Apesar da ampla utilização de latões com chumbo, como é o caso das torneiras domésticas, as tendências mais atuais apontam para a tentativa de reduzir as quantidades de chumbo, sobretudo em aplicações alimentares, pela sua toxicidade.

Para a análise ao microscópio ótico, selecionou-se o reagente anterior. As microestruturas obtidas no microscópio ótico na amostra da peça roscada grande encontram-se na Figura 89 a) e b). Já as microestruturas obtidas na amostra da peça roscada pequena encontram-se na Figura 90 a) e b).

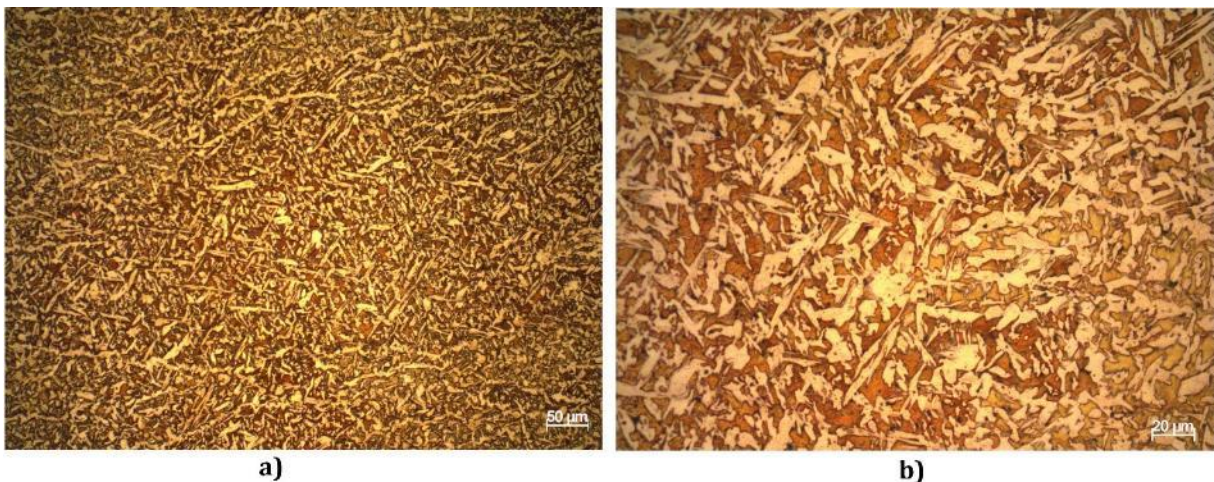


Figura 89 Microestruturas da amostra da peça roscada grande. Microestrutura típica de um latão (60-40) constituído pela fase β (cor escura) e fase α (cor clara). Reagente: Tabela 22 do anexo D2; a) objetiva 20X; b) destaque para a observação de vários pontos escuros dispersos pela microestrutura que, provavelmente são chumbo. Objetiva 50X.

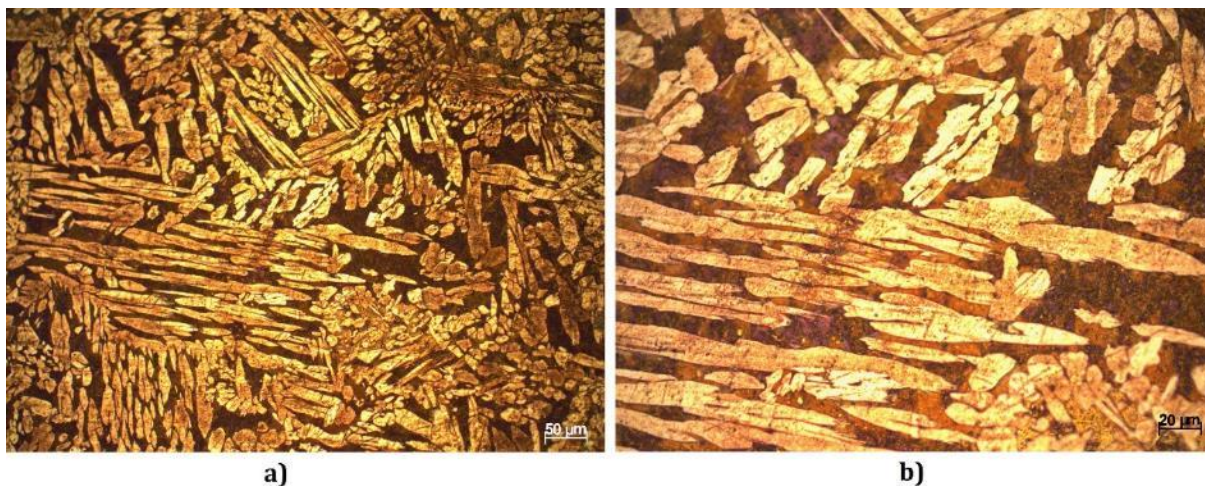


Figura 90 Microestruturas da amostra da peça roscada pequena. Microestrutura típica de um latão (60-40) constituído pela fase β (cor escura) e fase α (cor clara). Reagente: Tabela 22 do anexo D2; a) objetiva 20X; b) objetiva 50X.

Verifica-se que são microestruturas típicas de um latão (60-40), com a fase β (zinco), em cor escura e a fase α (cobre), em cor clara, idênticas às observadas na amostra da placa permutadora de calor (Figura 85). Observa-se, todavia, que a peça roscada grande, na Figura 89 b) apresenta uma microestrutura mais refinada do que a placa permutadora de calor na Figura 85 b) e do que a peça roscada pequena, na Figura 90 b), o que pode justificar a dureza mais elevada que foi obtida nesta amostra.

Destaque para a provável presença de partículas de chumbo (pontos escuros) dispersas na microestrutura da rosca grande na Figura 89 b). Este é um fenómeno típico dos latões com cerca de 2% de Pb, como é o caso.

Verificou-se, anteriormente, que as peças roscadas possuem um revestimento exterior. Embora não se tenha efetuado uma análise detalhada do mesmo é possível que se trate de uma liga de níquel-crómio, de utilização frequente no revestimento de peças em latão. Por norma, o níquel é o elemento primário deste tipo de revestimentos, contribuindo com uma maior proteção da peça contra a corrosão. Já o crómio representa, apenas, 2% da sua composição e está associado, sobretudo, à alteração da aparência final da peça, conferindo-lhe um aspeto metálico e branco. No entanto, a composição química destas ligas pode ser ajustada em função do tipo de proteção que se pretende dar à peça [78].

Neste caso em particular, como as peças estão em contacto com a água, é possível que o revestimento funcione como uma proteção adicional das peças contra a corrosão. Na Figura 91 b) e na Figura 92 b) observam-se, respetivamente, as espessuras dos revestimentos das peças roscadas grande e pequena, verificando-se que estes têm, aproximadamente, 3μm.

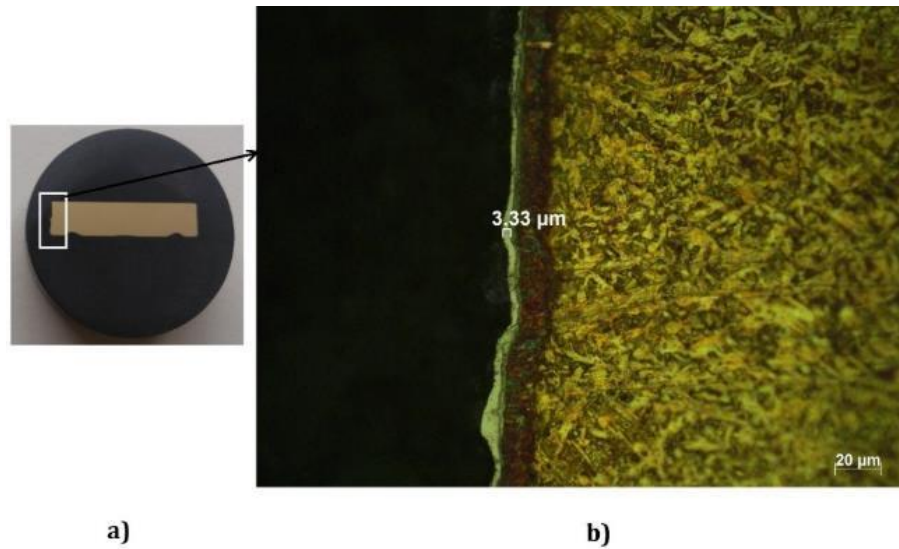


Figura 91 Peça roscada grande; a) amostra da peça com indicação do local em análise na microestrutura b); b) microestrutura com indicação da espessura do revestimento ($3.33\mu\text{m}$). Objetiva: 50X. Reagente: Tabela 22 do anexo D2.

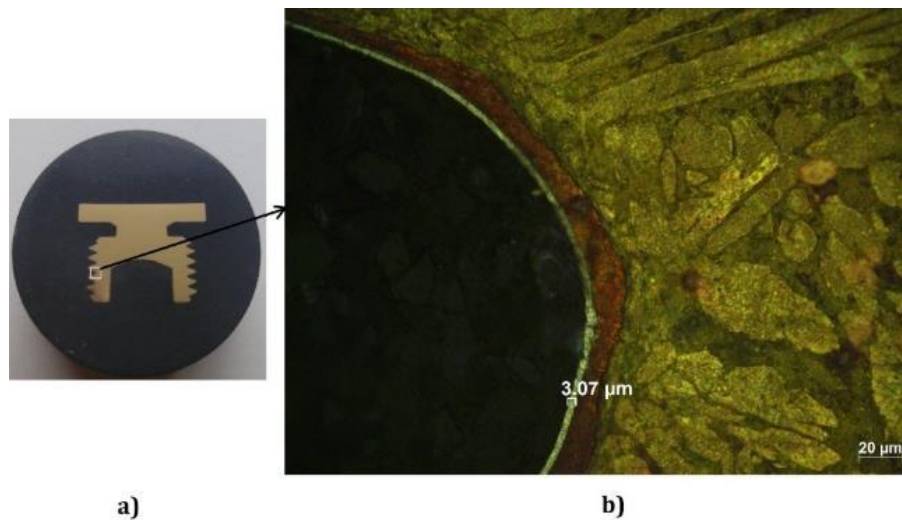


Figura 92 Peça roscada pequena; a) amostra da peça com indicação do local em análise na microestrutura b); b) microestrutura com indicação da espessura do revestimento ($3.07\mu\text{m}$). Objetiva: 50X. Reagente: Tabela 22 do anexo D2.

4.3.5 Mola do êmbolo

A mola do êmbolo (Figura 93 a) está apoiada no aro de suporte da mola e é comprimida pela pressão exercida pela água que se vai acumulando por baixo da placa permutadora de calor (Figura 55). Tal como nos casos anteriores, esta foi seccionada para se preparar a respetiva amostra (Figura 93 b).

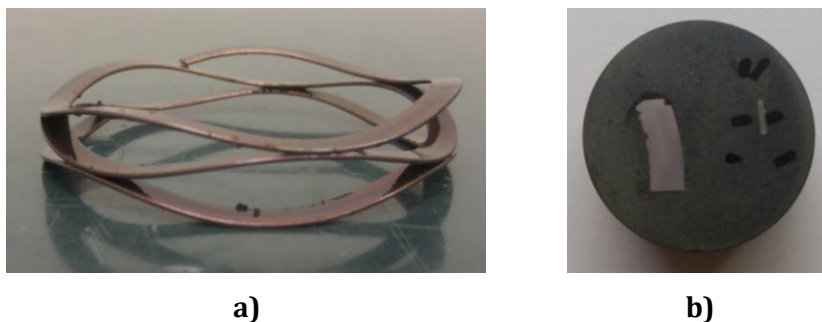


Figura 93 Mola do êmbolo e respetiva amostra; a) mola do êmbolo no estado inicial; b) amostra da mola.

Na Tabela 16 encontram-se os resultados obtidos para a massa volúmica da mola e para a dureza média superficial. Devido à reduzida dimensão da secção da mola, não foi possível medir a dureza no seu interior, tal como efetuado para as outras peças.

Tabela 16 Massa volúmica da mola (arredondados às centésimas) e dureza média superficial (arredondada às unidades), com uma carga de 20kg.

Massa volúmica [g/cm³]	6.66
Dureza média superficial [HV]	593

Atendendo à elevada dureza verificada na superfície da mola, verifica-se que, muito provavelmente, se está perante um aço com mais de 0.3% de C. Trata-se de um aço tratado e cromado, sendo que o revestimento superficial da mola foi removido na lixa, durante o polimento. Dada a reduzida dimensão da secção da mola, não foi possível observar este revestimento no microscópio ótico e determinar a sua espessura, pelo que um estudo mais detalhado do mesmo implicaria a utilização de outras técnicas (microscopia eletrónica), que permitam a obtenção da composição química e de maiores ampliações.

Para atacar a amostra tentaram-se, primeiro, o *Nital 2%* e o *Nital 10%*, sendo que nenhum deles produziu qualquer efeito na amostra. Por fim, tentou-se o *Villela's* e obtiveram-se as microestruturas da Figura 94 a) e b). Informações adicionais em relação ao reagente *Villela's* podem ser encontradas na Tabela 23 do anexo D3.

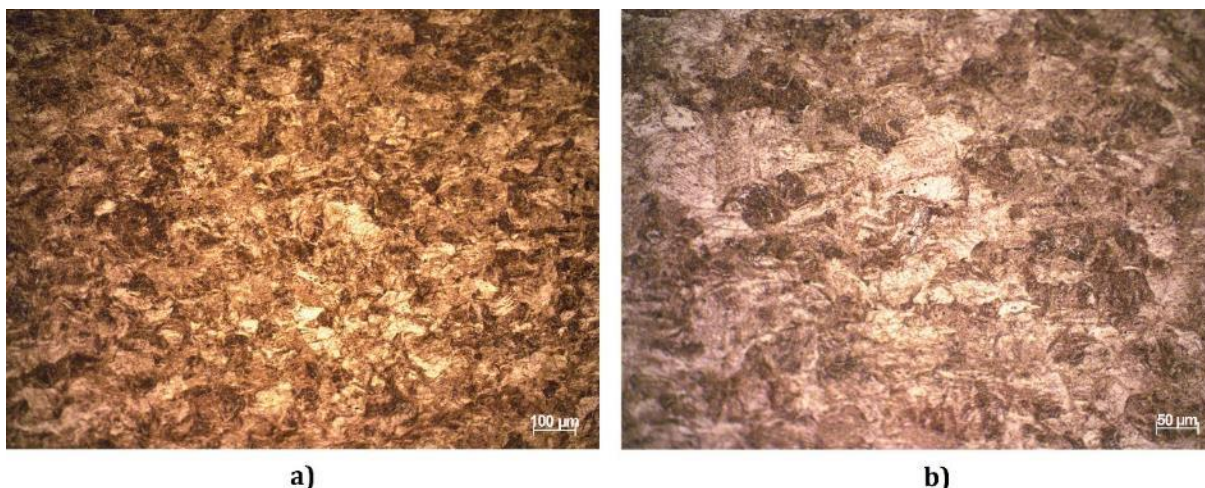


Figura 94 Microestrutura típica de um aço tratado. Reagente: *Villela's*; a) objetiva: 10X; b) objetiva: 20X.

4.3.6 Resumo dos resultados

Em seguida resumem-se os principais resultados obtidos da caracterização metalográfica dos constituintes do grupo de extração (Tabela 17). Todos os ensaios de dureza foram realizados com uma carga de 20kg, à exceção dos tubos da água e da resistência, em que a carga usada foi de 100g.

Tabela 17 Tabela resumo dos resultados obtidos na análise metalográfica de cada constituinte do grupo de extração.

Constituinte	Liga	Dureza superficial [HV]	Dureza na amostra [HV]	Massa volúmica [g/cm³]
Termobloco A	A336	100	98	2.46
Termobloco B	A361	70	67	2.64
Termobloco C	A339	88	82 (C1) 72 (C2)	3.13
Base metálica de suporte	A339	107	94	2.59
Êmbolo da cápsula	6061 T6	124	120	2.67
Aro de suporte da mola	6061 T6	106	105	2.64
Placa permutadora de calor	C87900	-	92	8.12
Peça roscada grande	C86400	109	117	8.14
Peça roscada pequena	C86400	-	97	7.55
Mola do êmbolo	-	593	-	6.66
Tubos da água	AISI304	303	-	-
Tubo da resistência	AISI304	144	-	-

4.4 Análise térmica do termobloco

Um dos componentes mais importantes da máquina de café, se não o mais importante, é o termobloco. Dele dependem, diretamente, a qualidade do café e o tempo de extração do mesmo. Idealmente, o termobloco é concebido para atingir as temperaturas ideais à tiragem do café, do modo mais rápido possível, sendo a melhor combinação entre eficiência, ecologia e economia. A eficácia no aquecimento do termobloco pode ser conseguida de várias formas, como pela modificação do material que o constitui, alteração do seu *design*, introdução de uma resistência com maior potência, adição de revestimentos para evitar perdas de calor ou, então, pelo projeto de uma solução construtiva completamente distinta. No entanto, qualquer uma destas modificações só deve ser efetuada se os melhoramentos obtidos compensarem eventuais custos adicionais.

Nesta secção, pretende-se estudar e avaliar, para o termobloco da máquina em estudo (termobloco A), a evolução espacial e temporal do aquecimento do termobloco e da água que passa no seu interior, concluindo-se acerca da viabilidade em manipular alguns dos parâmetros referidos anteriormente. Para tal, é efetuada uma simulação térmica no *Abaqus*® [5] e são analisados os resultados obtidos.

4.4.1 Formulação do problema

4.4.1.1 Síntese dos dados necessários à simulação

Antes da realização da análise térmica é conveniente sintetizar a informação recolhida nos capítulos anteriores, em relação ao funcionamento, à constituição e às propriedades físicas dos materiais dos diversos componentes do termobloco, com interesse para a simulação. Não é referido o material da resistência do termobloco porque, como é referido posteriormente, este não foi considerado para efeitos de simulação.

Em relação ao funcionamento e à constituição do termobloco sabe-se que:

- aquece devido a uma resistência que existe no seu interior, cujos valores do diâmetro e da potência (Tabela 18) são conhecidos;
- possui canais de água no seu interior, de diâmetro e material conhecidos;
- possui uma sonda de temperatura (22) cuja localização é conhecida;
- a água só entra no interior dos seus canais, quando o termobloco estiver quente, ou seja, quando a sonda de temperatura (22) deteta temperaturas próximas dos 100°C⁵. Até este instante, não existe água no seu interior;
- possui um termostato de segurança (20), cuja localização é conhecida, que interrompe o seu aquecimento, caso a sonda de temperatura (22) detete temperaturas iguais ou superiores a 165°C (condição de segurança);
- a água é bombeada por uma bomba (6) que tem uma pressão de funcionamento, aproximadamente, de 16bar;

Na Figura 95 está representado o termobloco com indicação da resistência, dos tubos da água, do termostato de segurança (20) e da sonda de temperatura (22).

⁵ Na realidade, as temperaturas estão compreendidas entre 90 e 106°C (secção 3.2.2), todavia, para efeitos de simulação, considerou-se a média deste intervalo, ou seja, aproximadamente 100°C.

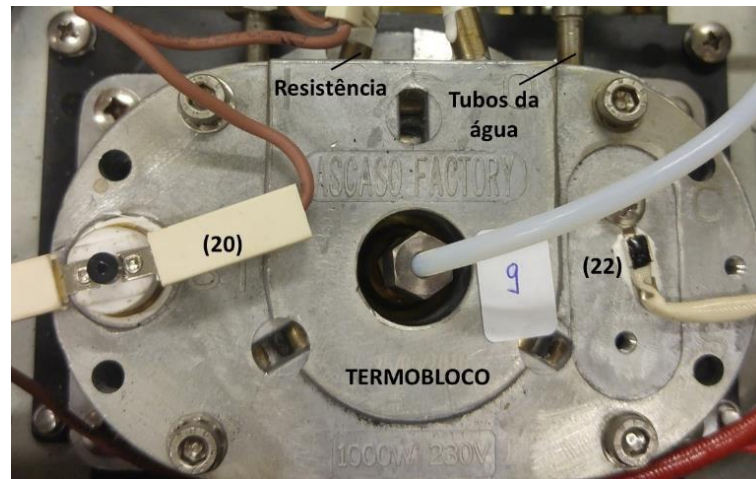


Figura 95 Termobloco montado na máquina, com indicação da resistência, dos tubos da água, do termostato de segurança (20) e da sonda de temperatura (22).

Na Tabela 18 encontram-se os valores, teórico e calculado, da potência da resistência elétrica.

Tabela 18 Valores teórico e calculado da potência da resistência elétrica.

	Potência [W]	
	Valor teórico	Valor calculado
Resistência	1000	1017

O valor calculado resulta da medição da real, com recurso a um multímetro, da resistência (R) que passa entre os dois terminais da resistência do termobloco, obtendo-se o valor 52Ω . Como na rede a tensão (V) é de $230V$, tem-se que a intensidade (I) é $\approx 4,423A$ (Eq.1). Assim, a potência real (P) é de $1017W$ (Eq.2).

$$V[V] = R[\Omega] \cdot I[A] \quad (\text{Eq.1})$$

$$P[W] = V[V] \cdot I[A] \quad (\text{Eq.2})$$

Na Tabela 19 encontram-se as principais propriedades físicas do aço inoxidável AISI 304, identificado para os canais da água, na secção 4.3.1.

Tabela 19 Dados do material do canal da água (AISI 304) [71].

Massa específica [kg/m ³]	Condutividade térmica [W/m·K]	Calor específico [J/kg·K]
7900	15 ⁶	480

⁶ Valor da condutividade térmica à temperatura de $20^{\circ}C$ [71].

Na Tabela 20 resumem-se as propriedades físicas da liga identificada para o termobloco (A336).

Tabela 20 Dados do material do termobloco (liga A336) [67].

Massa específica [kg/m ³]		Condutividade térmica [W/m·K]	Calor específico [J/kg·K]
Liga A336	Valor medido		
2713	2460	117.15 ⁷	970

Note-se que o valor determinado por via experimental para a massa específica é ligeiramente inferior ao valor teórico da liga. Isto pode estar relacionado, entre outros factos, com o termobloco apresentar porosidade (Figura 62, da secção 4.3.1), ou de a liga identificada não possuir uma composição química exatamente igual à real do termobloco (Tabela 2 da secção 4.3.1). Assim, embora a Tabela 20 apresente dois valores para a massa específica, na simulação, opta-se por utilizar o valor medido, por ser mais realista.

4.4.1.2 Formulação de objetivos

Os principais objetivos desta simulação são:

- estudar a evolução temporal das temperaturas no termobloco e na água, durante o seu aquecimento;
- estudar a distribuição espacial das temperaturas no termobloco e na água, em determinados instantes;
- perceber de que forma a geometria do termobloco influencia o modo como se dá o seu aquecimento;
- avaliar o rigor das temperaturas medidas no termobloco, tendo em consideração o seu local em que é efetuada esta medição;
- inferir acerca da influência da geometria do tubo da água e das propriedades do seu material, no aquecimento da água;
- identificar fragilidades no sistema de aquecimento, caso existam, propondo soluções, com base nos resultados obtidos;

4.4.2 Preparação do modelo CAD

O primeiro passo consiste na modificação do modelo CAD (*Computer Aided Design* – Desenho Assistido por Computador) do termobloco, previamente concebido em *SolidWorks*® [60], para o preparar para o *software Abaqus*® [5]. O objetivo é tentar minimizar e evitar a ocorrência de erros na conversão entre programas.

Começou-se, então, por simplificar a geometria já modelada, removendo-se raios e chanfros existentes nas arestas do termobloco. Em seguida, tentou-se que o modelo ficasse mais compatível com o *Abaqus*® [5] e, por isso, refizeram-se os tubos interiores da resistência e da água. Na modelação do tubo da resistência desprezaram-se os diferentes elementos existentes no seu interior, criando-se um tubo sólido de diâmetro 5mm. Já nos tubos da água, criou-se um tubo com

⁷ Condutividade térmica fornecida à temperatura de 25 °C [67].

um diâmetro exterior de 5mm e um diâmetro interior de 4mm, oco por dentro, para a circulação da água.

Na Figura 96 encontra-se o modelo CAD após todas as alterações referidas. Destaque para a inexistência de raios ou chanfros nas arestas do termobloco. Também são indicadas as principais dimensões do termobloco, dos tubos da água e da resistência e as localizações da sonda de temperatura (22) e do termostato de segurança (20).

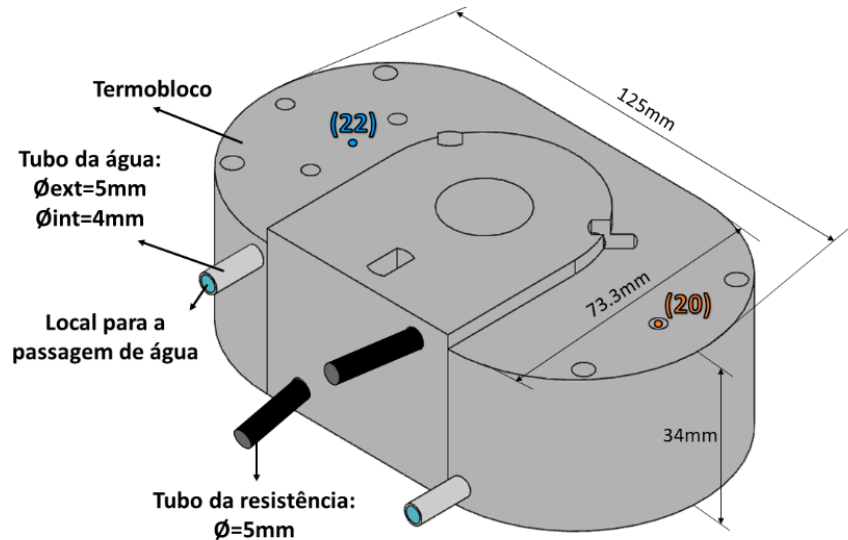


Figura 96 Modelo CAD com todas as alterações, pronto a ser implementado no *Abaqus®*, sendo visível que as arestas do termobloco não possuem chanfros ou raios e com indicação das dimensões principais dos tubos e do termobloco. Também é indicada a localização da sonda de temperatura (22) e do termostato de segurança (20) [5].

No Anexo E é apresentada a metodologia utilizada para a implementação do problema térmico no *Abaqus®*, sendo especificados e justificados os valores introduzidos nos diversos parâmetros. É, também, neste anexo que se encontram as condições fronteira consideradas na realização da simulação. A leitura deste anexo pode facilitar a compreensão da próxima secção.

4.4.3 Análise e discussão de resultados

Durante a formulação do problema térmico e a sua implementação no *Abaqus®* [5], tentou-se que a simulação fosse o mais realista possível. No entanto, como este trabalho começou a ser elaborado numa fase intermédia do projeto, na qual, alguns aspetos relativos ao funcionamento do termobloco ainda não estavam bem esclarecidos, assumiram-se determinados pressupostos que, posteriormente, numa fase já tardia, não foram possíveis corrigir devido a limitações de tempo.

Assim, enquanto, na realidade, a água só entra no interior dos canais do termobloco para aquecer, quando a sonda de temperatura (22) deteta, em média, os 100°C, na simulação, considerou-se que o termobloco possui os seus canais preenchidos com água, a velocidade nula, desde o instante inicial, sendo que esta vai aquecendo em simultâneo com o termobloco e entra em movimento após os 100°C. Obviamente, esta consideração tem influência no modo como evolui o aquecimento do termobloco e, também, na temperatura da água obtida. Por essa razão, embora não tenha sido possível refazer a simulação na sua totalidade, realizou-se uma simulação isolada do aquecimento do termobloco, sem água no seu interior, para avaliar em que medida a

consideração da existência de água afeta o seu aquecimento. Este estudo pode ser encontrado na secção 4.4.3.2.

Na secção 4.4.3.1 são analisados os resultados obtidos na simulação em que considera a existência de água no interior do termobloco, desde o instante inicial.

4.4.3.1 Simulação do aquecimento do termobloco e da água

Para ser possível realizar a simulação completa, que contempla o aquecimento do termobloco com a água parada e com a água em circulação, é preciso definir, nas condições fronteira (anexo E6), o instante a partir do qual se dá o início da circulação da água. No entanto, para que tal seja possível, é necessário conhecer o instante em que a sonda de temperatura (22) deteta, aproximadamente os 100°C.

Assim, para determinar este instante, realizou-se uma primeira simulação que permite avaliar a evolução temporal do aquecimento do termobloco, durante 60s, em locais específicos e estudar, para um determinado instante, a distribuição espacial das temperaturas no mesmo.

Começando pelo termobloco, tem-se que os pontos selecionados para análise de temperaturas são a sonda de temperatura (22) (nó 41268), o termostato de segurança (20) (nó 37221), um ponto na superfície da saída do tubo da água (T) (nó 19658) e um ponto na extremidade do termobloco (E) (nó 5450), tal como representado na Figura 97.

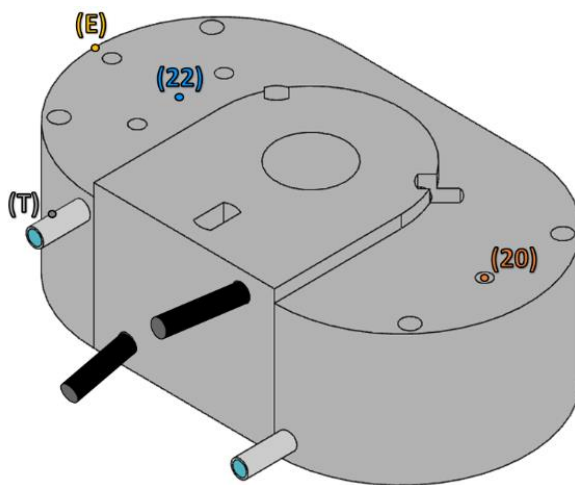


Figura 97 Pontos em análise no modelo: (20) termostato de segurança (nó 37221), (22) sonda de temperatura (nó 41268), (E) extremidade do termobloco (nó 5450) e (T) topo da saída do tubo da água (nó 19658).

No gráfico da Figura 98 observa-se a evolução das temperaturas dos nós identificados na Figura 97, durante os primeiros 60s do aquecimento do termobloco.

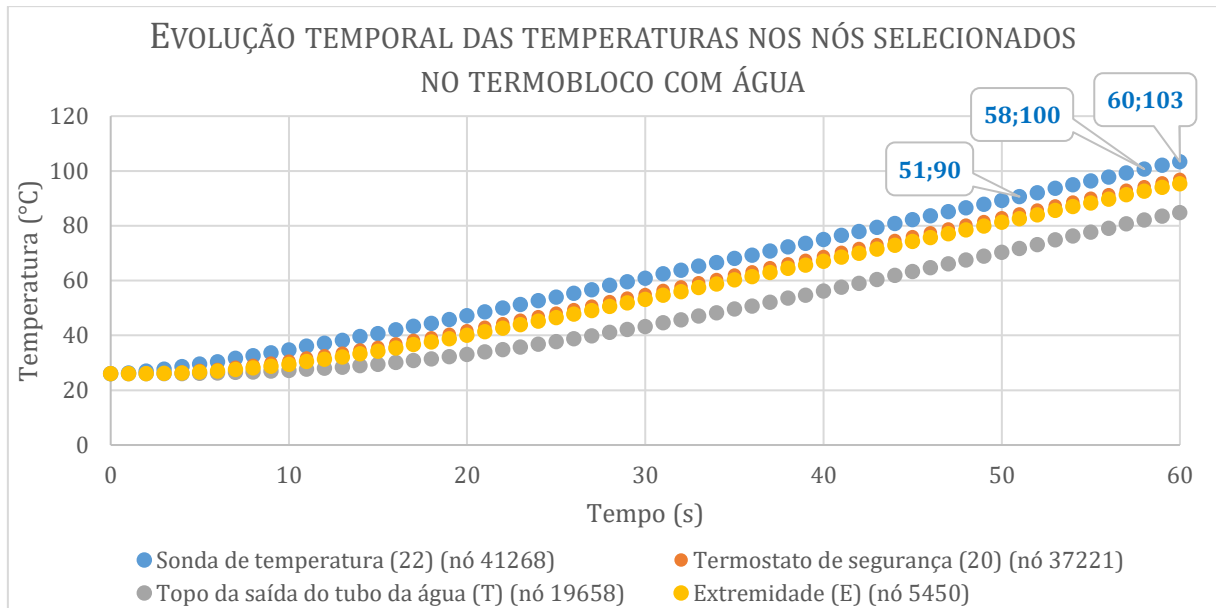


Figura 98 Evolução das temperaturas de cada um dos pontos em análise, ao longo de 60s do aquecimento do termbloco, considerando que este tem água no interior dos seus canais, desde o instante inicial.

Assumindo que, em média, a água começa a circular quando a sonda de temperatura (22) atinge os 100°C, tem-se que, tal acontece, por volta dos 58s. Na prática, a água pode começar a circular em qualquer instante compreendido no período que começa nos 51s (quando a sonda de (22) deteta, aproximadamente, os 90°C) e que se prolonga após os 60s (até a sonda (22) detetar os 106°C). Nas condições fronteira introduzidas no anexo E6, definiu-se, no modelo fluídico, que a água começa a circular a partir dos 60s.

Da análise do gráfico da Figura 98, verifica-se, ainda, que os pontos partem da temperatura ambiente (26°C) e aquecem numa tendência semelhante. No entanto, a sonda de temperatura (22) é, claramente, a que atinge as temperaturas mais elevadas, mais rapidamente. Em oposição, o topo do tubo da água (T) é o que apresenta um aquecimento mais lento. Já a extremidade (E) do termbloco e o termostato de segurança (20) atingem praticamente as mesmas temperaturas ao mesmo tempo, embora a zona do termostato de segurança (20) tenha um aquecimento ligeiramente mais rápido do que a extremidade (E).

Na Figura 99 é possível observar a distribuição espacial das temperaturas (K) pelo termbloco, no instante $t=60s$, observando-se que as temperaturas mais elevadas se encontram nas zonas mais próximas da resistência e que o fluxo de calor é distribuído radialmente pelo termbloco.

Assim, a maior ou menor rapidez com que os pontos indicados atingem uma determinada temperatura está relacionada com a posição de cada um no termbloco e com a sua maior ou menor proximidade à resistência (fonte de calor). No instante $t=60s$, a temperatura da sonda (22) é de 103°C (376.15K), a do termostato de segurança (20) é de, aproximadamente, 97°C (370.15K), a da extremidade (E) é de 95°C (368.15K) e a do topo da saída do tubo da água (T) é de, aproximadamente, 85°C (358.15K).

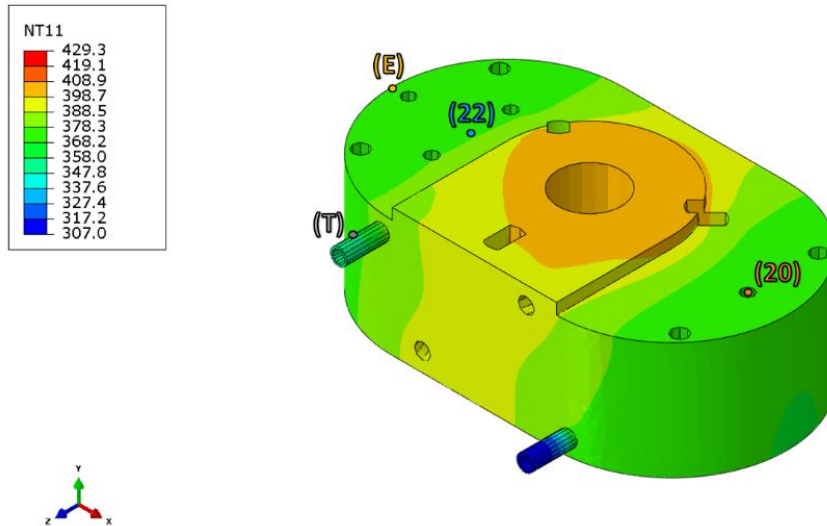


Figura 99 Distribuição espacial das temperaturas no termobloco (K), no instante $t=60s$.

Posto isto, pode-se analisar o aquecimento do termobloco, tendo em consideração que a água está a circular, ou seja, no período da simulação posterior aos 60s. A simulação total contempla um total de 72s de análise, pelo que são avaliados 12s com a água a circular.

Uma vez que o volume total de água disponível nos tubos do termobloco é de, aproximadamente, 11.7cm^3 e que o caudal de água que atravessa o tubo foi definido para ser de $2\text{cm}^3/\text{s}$ (secção anexo E6), então, a água leva, aproximadamente, 5.85s a percorrer a totalidade do tubo. Assim, como a circulação da água tem início aos 60s, uma simulação total de 72s permite a avaliação da passagem de dois ciclos de água, sendo que, neste caso, o primeiro corresponde à extração da água pré-existente e o segundo corresponde à passagem de água fresca que aquece no momento em que entra no termobloco.

No gráfico da Figura 100 é apresentada a evolução da temperatura no termobloco, para cada um dos pontos identificados anteriormente, ao longo dos 72s da simulação.

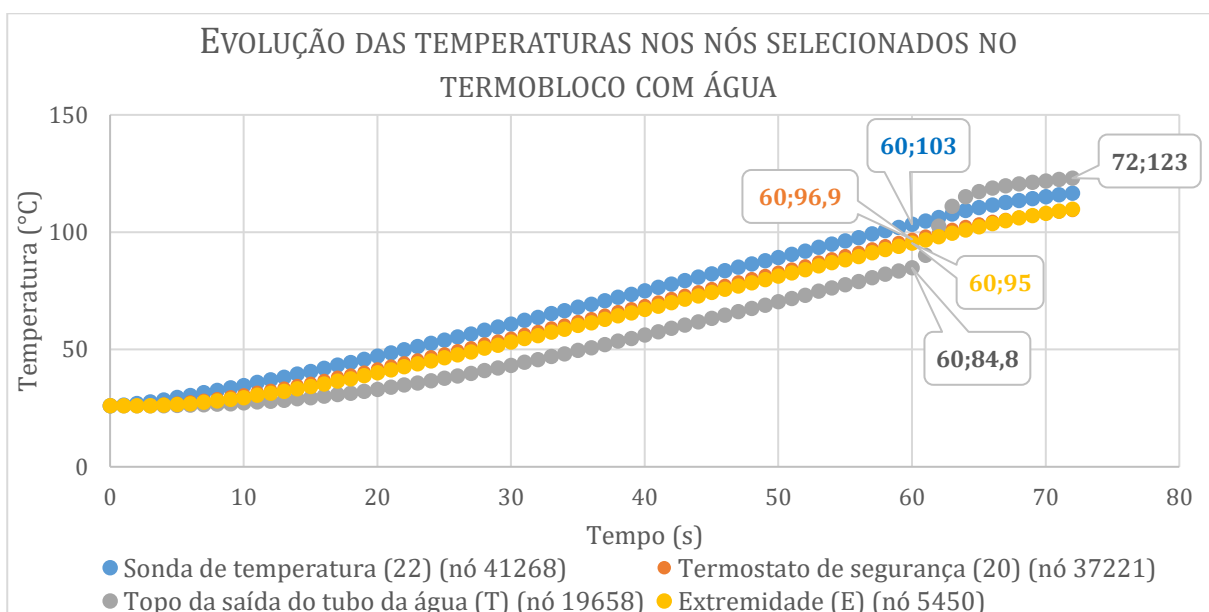


Figura 100 Evolução das temperaturas dos nós em análise, ao longo dos 72s da simulação, quando o termobloco possui água no seu interior.

Verifica-se que, após os 60s, a temperatura continua a aumentar, em todos os pontos, devido ao facto de se ter considerado, na simulação, que a resistência do termobloco continua ligada durante a circulação da água. No entanto, o modo como o aquecimento evolui não é igual em todos os nós.

Enquanto a evolução do aquecimento na sonda (22), no termostato de segurança (20) e na extremidade (E) é semelhante à registada no período anterior aos 60s, no topo da saída do tubo da água (T), existe um pico de temperaturas. Tal acontece devido ao início da circulação de água quente no seu interior, como é analisado posteriormente no gráfico da Figura 109.

Na Figura 101 encontra-se a distribuição das temperaturas no termobloco, para o instante final da simulação ($t=72s$). Neste instante, a temperatura da sonda (22) é de 117°C (390.15K), a do termostato de segurança (20) é de 109°C (382.15K), a da extremidade (E) é de 110°C (383.15K) e a do topo da saída do tubo da água (T) é de 123°C (396.15K).

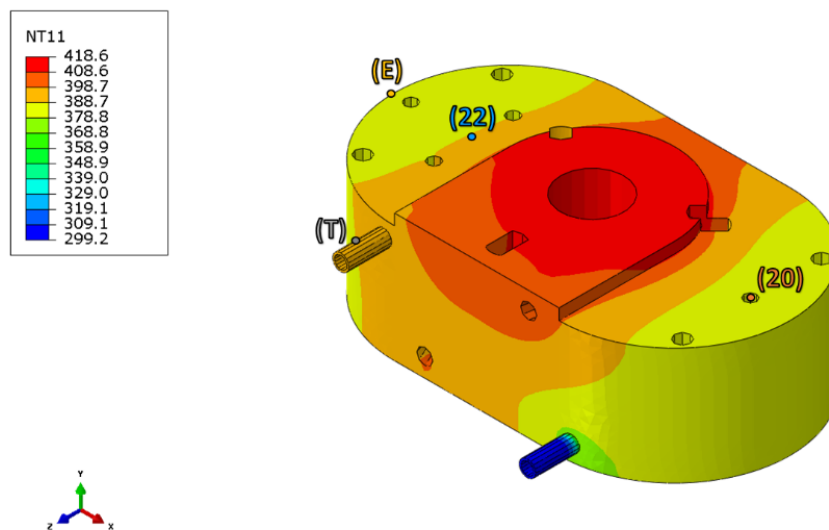


Figura 101 Distribuição espacial das temperaturas no termobloco (K), no instante $t=72$ (fim da simulação).

Posto isto, segue-se a análise do aquecimento da água, na qual se consideram os pontos identificados na Figura 102. Recorde-se que, embora não seja visível na Figura 102, o tubo da água envolve a resistência, que se encontra no seu interior.



Figura 102 Tubo da água seccionado, com o modelo fluídico no seu interior, para a identificação dos pontos considerados na análise do aquecimento da água: (A_{i1}) ponto no interior da água do patamar 1 (nó 91680), (A_{i2}) ponto no interior da água do patamar 2 (nó 91474), (A_{i3}) ponto no interior da água do patamar 3 (nó 93635), (A_{i4}) ponto no interior da água do patamar 4 (nó 93179) e (A_{i5}) ponto no interior da água do patamar 5 (nó 94885); (A_{e1}) ponto no exterior da água do patamar 1 (nó 1368), (A_{e2}) ponto no exterior da água do patamar 2 (nó 1566), (A_{e3}) ponto no exterior da água do patamar 3 (nó 1764), (A_{e4}) ponto no exterior da água do patamar 4 (nó 1962) e (A_{e5}) ponto no exterior da água do patamar 5 (nó 2160); (A_{is}) ponto no interior da água à saída (nó2317).

Os pontos (A_{i1-5}) e (A_{e1-5}) correspondem, respetivamente, às temperaturas da água no interior e no exterior da massa de fluído, em cada um dos patamares, sendo que o patamar inferior é o patamar 1 e o superior é o patamar 5. Também se avalia a temperatura da água no interior da massa de fluído à saída do tubo de água (A_{is}).

Comece-se por considerar, apenas, as temperaturas no interior e no exterior da massa de água, em cada patamar. Na Figura 103, observam-se as temperaturas registadas em cada um dos pontos em análise, no instante de 60s, quando o termobloco possui água parada no seu interior. Na Figura 104, observa-se a temperatura dos mesmos pontos, no instante 72s, último da simulação, em que a água já se encontra em circulação.

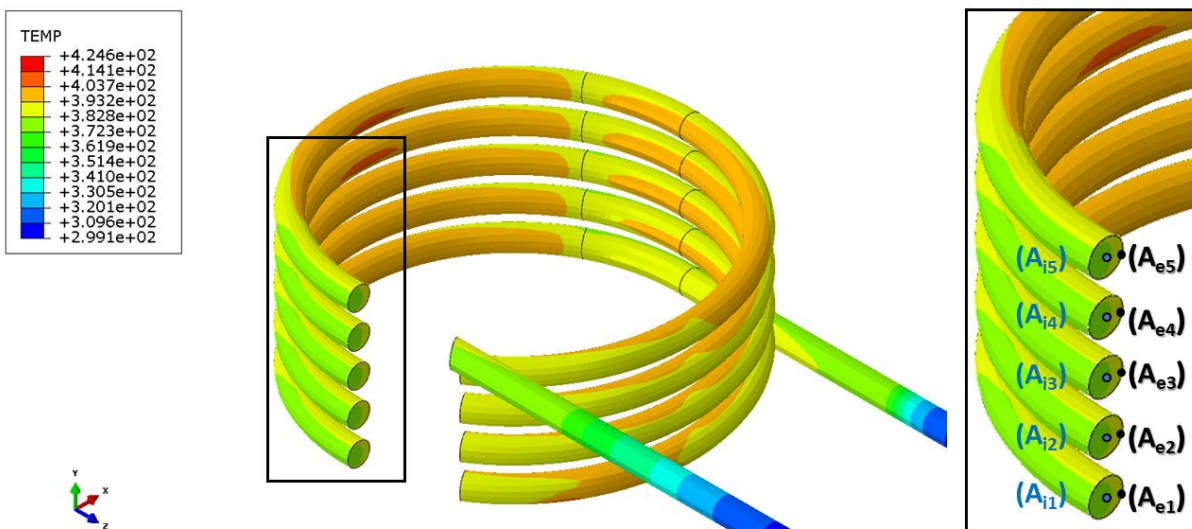


Figura 103 Distribuição da temperatura na água parada (K), para o instante $t=60s$.

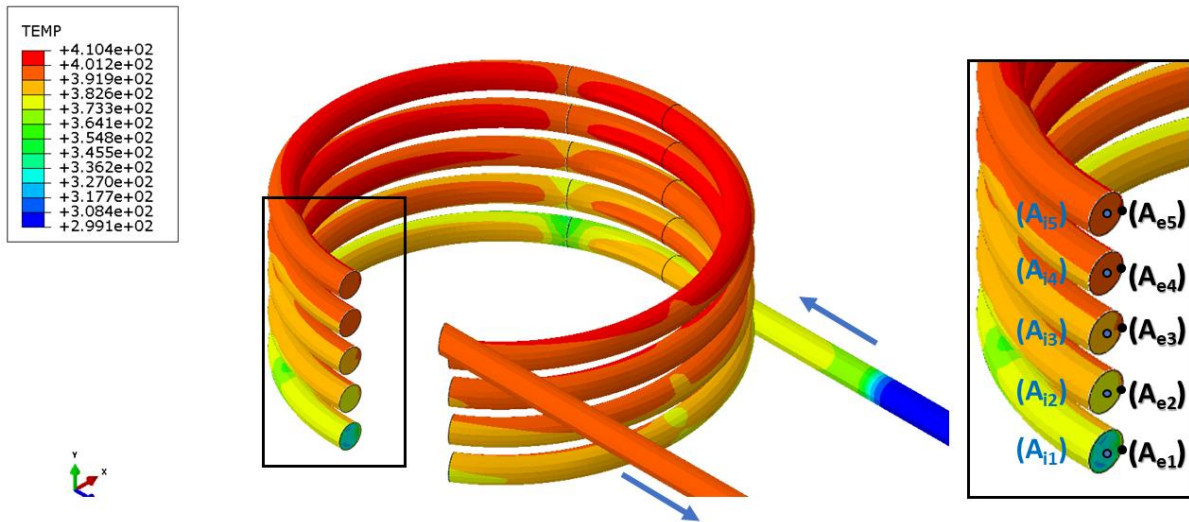


Figura 104 Distribuição da temperatura na água em circulação (K), para o instante $t=72s$.

A observação das imagens anteriores permite concluir, de imediato alguns aspetos importantes.

Em relação à Figura 103, conclui-se que, com a água parada, a evolução das temperaturas, tanto no interior, como no exterior da água, não depende dos patamares. No entanto, as temperaturas no exterior, são superiores às temperaturas no interior. Assim, enquanto no interior da massa de fluido, a temperatura da água ronda os 107°C (380.15K), em todos os patamares, no exterior, ronda os 117°C (390.15K), igualmente, em todos os patamares. Esta diferença deve-se, provavelmente, à maior proximidade do exterior à resistência.

Em relação à Figura 104, verifica-se que a temperatura da água varia com os patamares, sendo que as temperaturas mais baixas ocorrem no patamar 1 e as mais elevadas ocorrem no patamar 5. Observa-se, ainda, que a diferença entre as temperaturas exteriores e as temperaturas interiores é mais evidente no patamar 1 e vai reduzindo com os patamares, sendo que é quase nula no patamar 5. Assim, no instante $t=72s$, tem-se que $A_{i1} \approx 57^{\circ}\text{C}$ (330.15K) e $A_{e1} \approx 102^{\circ}\text{C}$ (375.15K), enquanto $A_{i5} \approx 127^{\circ}\text{C}$ (400.15K) e $A_{e5} \approx 129^{\circ}\text{C}$ (402.15K).

Os gráficos da Figura 105 e da Figura 106 apresentam, respetivamente, a evolução das temperaturas no interior e no exterior da massa de fluido, em cada patamar, ao longo de toda a simulação.

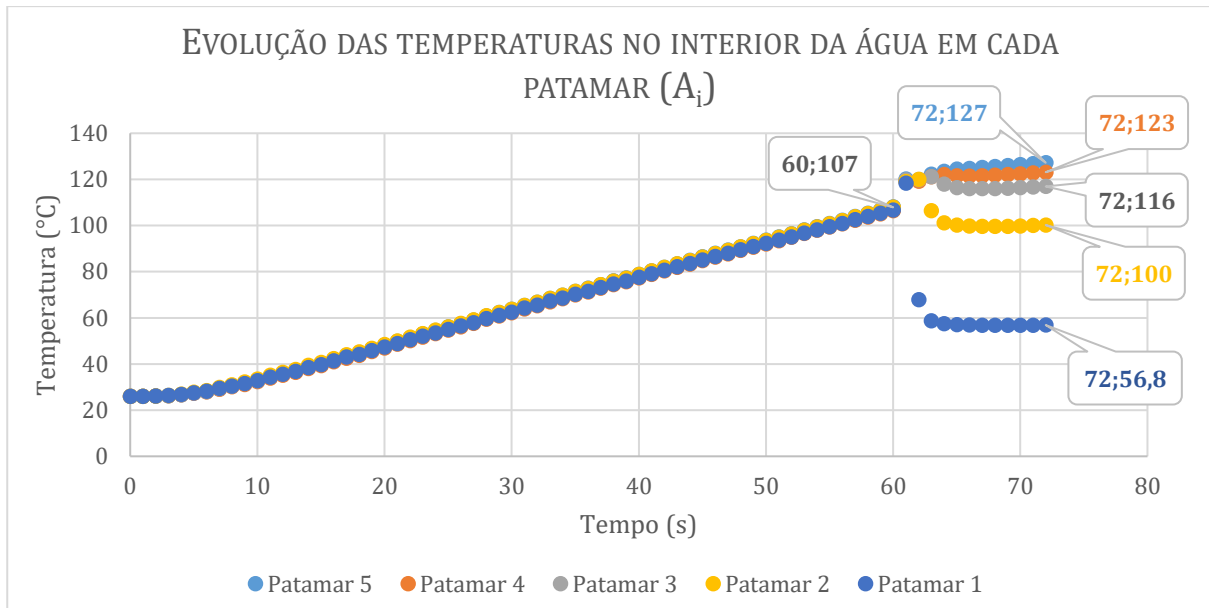


Figura 105 Evolução das temperaturas no interior da massa fluído, ao longo dos 72s da simulação, em cada um dos patamares.

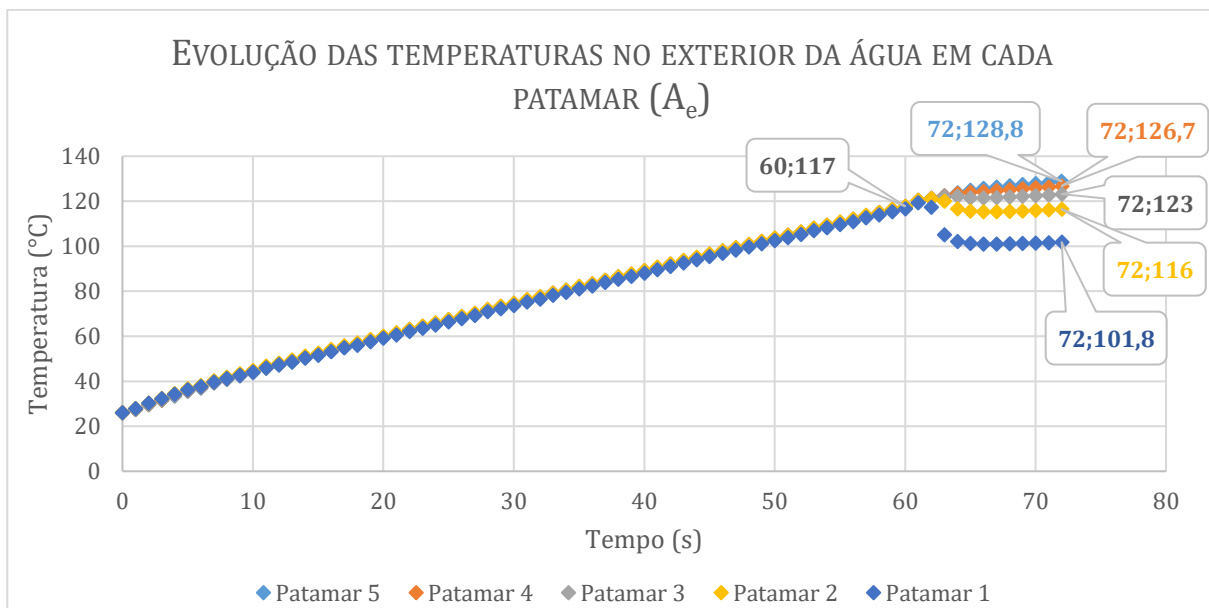


Figura 106 Evolução das temperaturas no exterior da massa fluído, ao longo dos 72s da simulação, em cada um dos patamares.

Observando os gráficos anteriores, verifica-se que, durante os primeiros 60s da simulação, as temperaturas evoluem de modo igual em todos os patamares, tanto para as temperaturas no interior como para as temperaturas no exterior. Tal acontece porque a água está parada no interior dos tubos, pelo que a tendência é para aquecer uniformemente em todos os pontos que estejam à mesma distância da fonte de calor. Assim, como os pontos considerados para análise em cada patamar, se encontram alinhados verticalmente, sendo equidistantes da resistência (a fonte de calor), a temperatura, em cada um destes pontos, evolui de forma semelhante. No entanto, os pontos no exterior da massa de fluído estão mais próximos da resistência, pelo que, em todos os patamares, as suas temperaturas são superiores às registadas nos pontos do interior da massa de fluído.

Também nos primeiros 60s dos gráficos da Figura 107 e da Figura 108, nos quais se comparam, respetivamente, as temperaturas dos patamares 1 e 5, no interior e no exterior da água, é visível que as temperaturas no exterior são superiores, apesar da evolução ser semelhante. Na verdade, a evolução é idêntica à registada, no termobloco, para o mesmo período (Figura 98 e Figura 99). Também é interessante verificar que, aos 60s, a temperatura da água no interior já se encontra 4°C acima da temperatura registada pela sonda de temperatura (22) nesse instante (Figura 100 e Figura 105), enquanto a temperatura no exterior já se encontra 14°C acima da mesma (Figura 100 e Figura 106).

Já a partir dos 60s, em ambos os gráficos (Figura 105 e Figura 106), a temperatura evolui de modo distinto em cada patamar, verificando-se a ocorrência de um decréscimo das temperaturas, que ocorre mais cedo, e de modo mais acentuado, nos patamares inferiores. Tal acontece porque o início da circulação da água no interior dos tubos é acompanhado pela entrada de “nova” água a temperatura inferior. Esta água entra no patamar 1 e vai aquecendo à medida que se desloca para os patamares superiores, pelo que, os patamares 3, 4 e 5 já não são afetados por estas diminuições repentinas de temperatura, embora a sua taxa de aquecimento ocorra a um ritmo inferior à verificada no período anterior aos 60s (existe aquecimento porque é considerado que a resistência continua ligada).

No gráfico da Figura 107 observa-se que, efetivamente, no patamar 1, existe um decréscimo de temperaturas, tanto no interior como no exterior do fluido, após os 60s. No entanto, esta queda é mais acentuada no interior do que no exterior. É provável que tal aconteça porque o exterior encontra-se na camada limite, onde as velocidades, junto ao tubo, são nulas e, por isso, o fluido está em maior repouso, para além de que estes pontos também estão mais próximos da resistência.

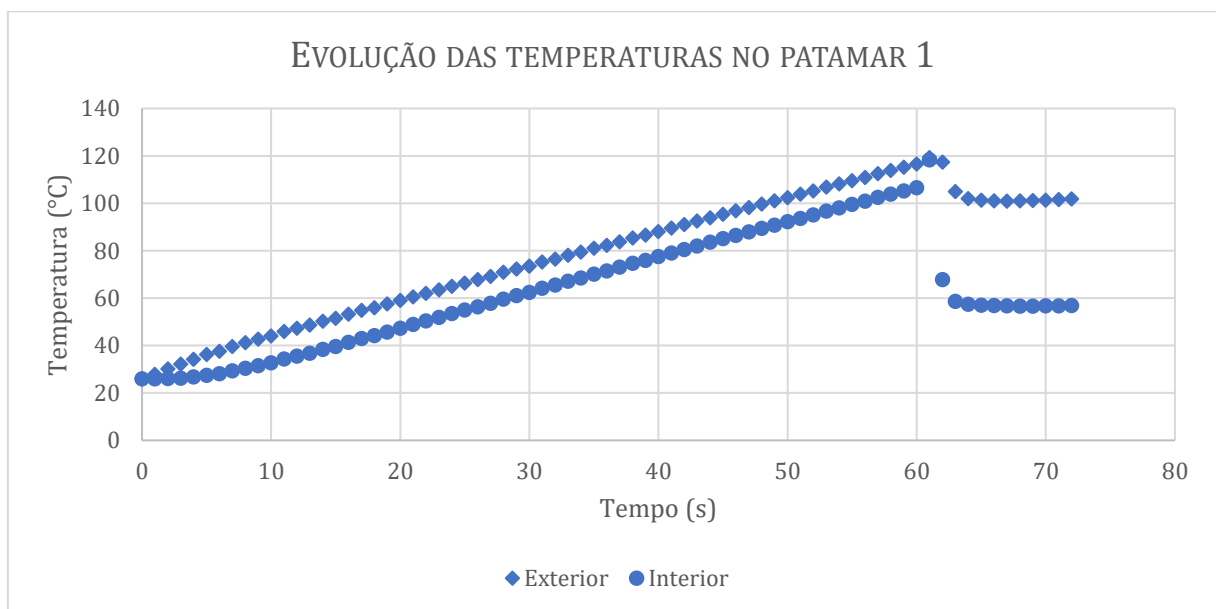


Figura 107 Evolução das temperaturas dos nós no interior e no exterior da massa de fluido, no patamar 1, durante os 72s da simulação.

No gráfico da Figura 108 observa-se que, no patamar 5, já não ocorre, após os 60s, o decréscimo de temperaturas referido anteriormente, para o patamar 1, sendo que a diferença entre a temperaturas no interior da água e no exterior, é praticamente nula.

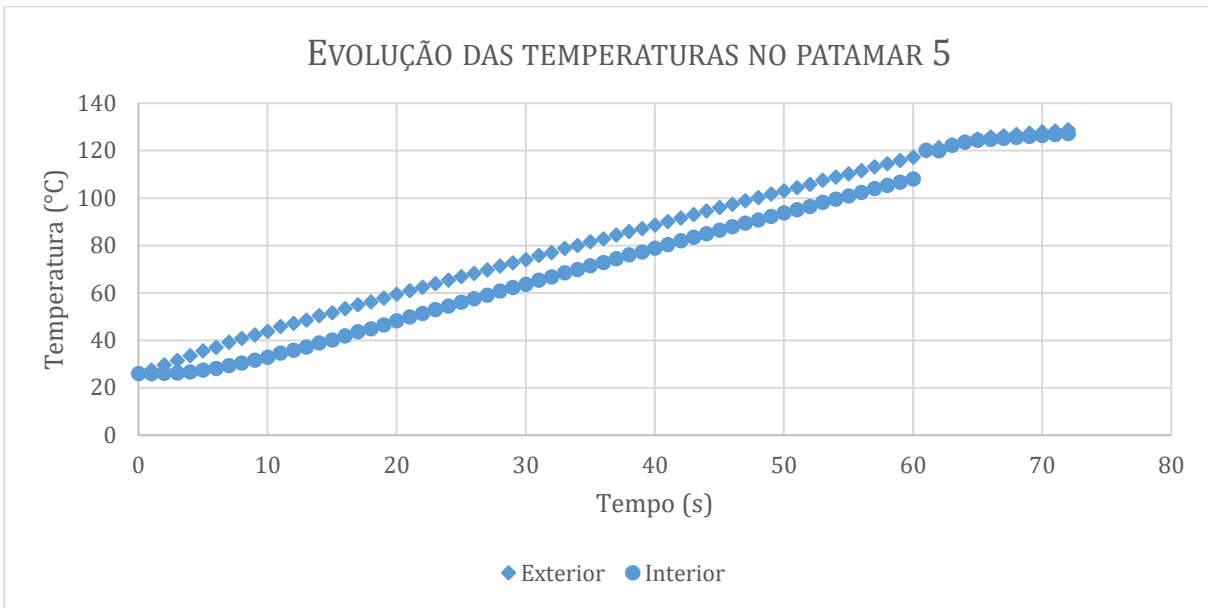


Figura 108 Evolução das temperaturas dos nós no interior e no exterior da massa de fluido, no patamar 5, durante os 72s da simulação.

É importante recordar que, na situação real, não existe água no interior do termobloco no instante inicial, pelo que o aquecimento da água só tem início quando esta entra no termobloco. Nesse caso é provável que não se registem estes decréscimos de temperatura, sendo que a água teria um crescimento gradual da temperatura em cada patamar.

No gráfico da Figura 109 é possível comparar as temperaturas no interior da água à saída (A_s) com as registadas no interior da água no patamar 5 (A_{i5}).

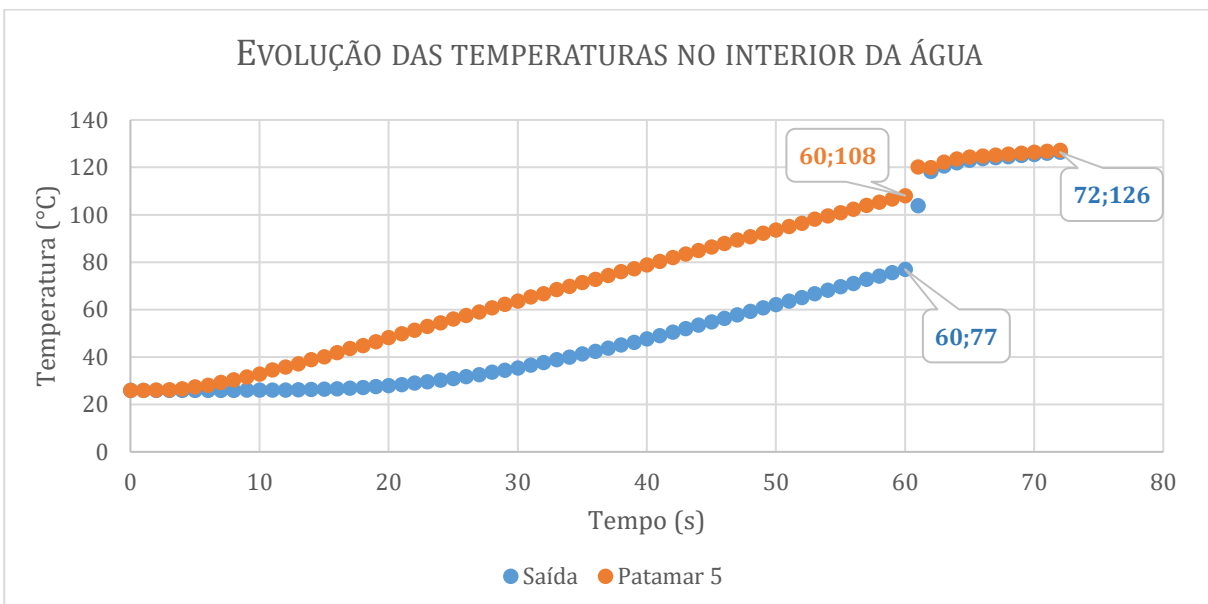


Figura 109 Evolução da temperatura no interior da água ao longo dos 72s da simulação.

Verifica-se que, nos primeiros 60s, a água aquece mais rapidamente no patamar 5 (A_{i5}) do que na saída (A_s), provavelmente, porque o primeiro se encontra no interior do termobloco, numa zona mais próxima da resistência. No fim dos 60s, tem-se $A_{i5} \approx 108^\circ\text{C}$ e $A_s \approx 77^\circ\text{C}$.

No entanto, com o início da circulação da água, a água que se encontra na extremidade (A_s) é expelida para o exterior e a que se encontra em (A_{i5}), a uma temperatura bastante superior, chega à saída, alguns segundos depois, o que leva a que exista um pico de temperatura na saída, após os 60s. Tal como referido aquando da análise do gráfico da Figura 100, o ponto (T) no topo da saída do tubo de água, acompanha esta evolução da temperatura da água à saída.

Em seguida, tenta-se avaliar a diferença de temperaturas registada entre o tubo onde circula a água e a água, no mesmo instante, para que se possa inferir acerca da influência do material e da geometria do tubo no aquecimento da água. Recorde-se que a espessura do tubo é de 1mm, sendo que o seu diâmetro exterior é de 5mm e que a resistência se encontra envolvida pelo mesmo.

Os pontos considerados na análise são os pontos no interior e no exterior da massa de fluido do patamar 5, respetivamente, (A_{i5}) e (A_{e5}) e o ponto correspondente ao exterior do tubo da água, no patamar 5, que se encontra do lado da resistência (T_5), tal como representado na Figura 110. É importante salientar que (A_{i5}), (A_{e5}) e (T_5) estão alinhados no mesmo plano horizontal e que o exterior da água é coincidente com o interior do tubo.

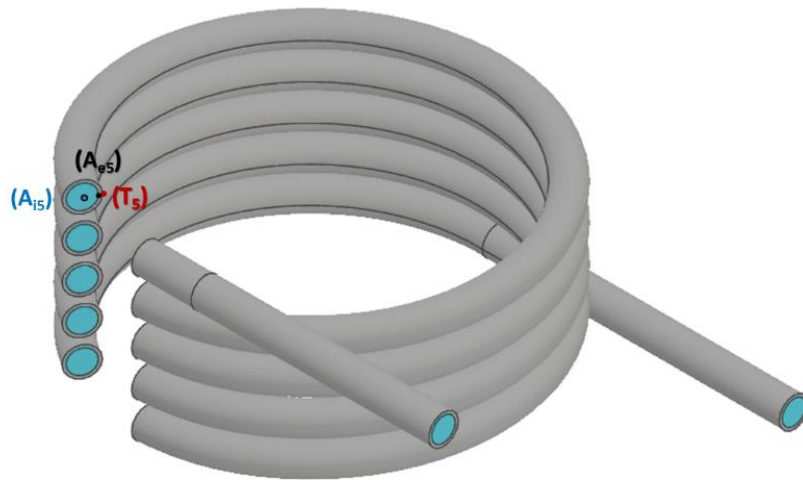


Figura 110 Tubo da água em corte, com o modelo fluídico no seu interior, para a identificação dos pontos considerados na análise do tubo: (A_{i5}) ponto no interior da água do patamar 5 (nó 94885), (A_{e5}) ponto no exterior da água do patamar 5 (nó 2160) e (T_5) ponto no exterior do tubo no patamar 5 (nó 73).

No gráfico da Figura 111 encontra-se a evolução da temperatura nestes pontos, ao longo dos primeiros 60s da simulação. Verifica-se que, em todos os instantes, a temperatura no tubo (T_5) é superior à temperatura da água o que se deve, provavelmente, à sua maior proximidade à resistência.

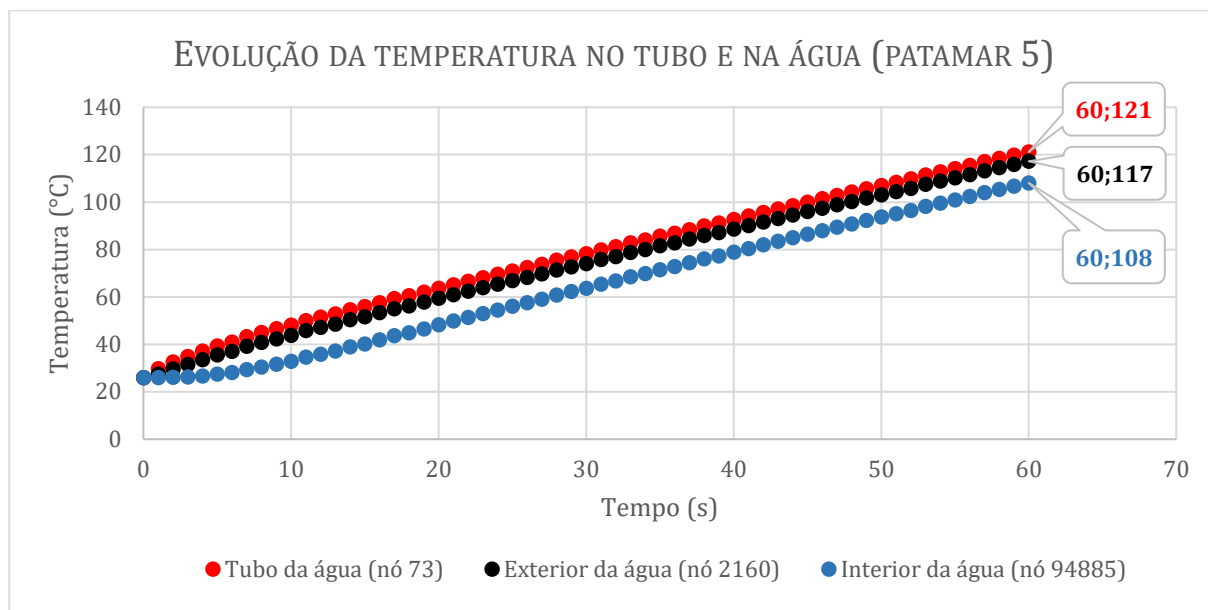


Figura 111 Evolução das temperaturas no tubo da água (T_5) (nó 73) e no interior (A_{i5}) (nó 94885) e no exterior da água (A_{e5}) (nó 2160), no patamar 5, durante os primeiros 60s da simulação.

Observa-se, ainda, que entre o exterior do tubo e o exterior da água, ou seja, entre o exterior do tubo e o interior do tubo, existe uma diferença de temperaturas que ronda os 4°C. Esta diferença é uma consequência das propriedades introduzidas no material do tubo e da sua espessura (o ponto (T_5) está 1mm mais próximo da resistência). A maior diferença de temperaturas registada está entre o ponto (T_5) e o ponto (A_{i5}) e ronda os 13°C.

Por fim, é interessante referir que, no instante $t=60s$, em que a água começa a circular, a sonda de temperatura (22) está nos 103°C (Figura 100), enquanto a temperatura do tubo no patamar 5 (T_5) já está nos 121°C (Figura 111) e a temperatura no tubo à saída (T) ronda os 85°C (Figura 100). Assim, o local onde se efetuam as medições de temperatura pode ter um impacto significativo na precisão da leitura que se faz e, conseqüentemente, na rapidez do funcionamento do grupo de extração e na qualidade do café, uma vez que um café de qualidade requer condições de temperatura específicas.

4.4.3.2 Aquecimento realista do termobloco (sem água) - avaliação do erro

Uma vez que toda a simulação anterior foi realizada com o pressuposto de que existe água no termobloco desde o instante inicial, decidiu-se efetuar uma simulação isolada do modelo sólido, para avaliar em que medida é que esta consideração pode influenciar o aquecimento do termobloco. Nesta nova simulação, não se considera a existência de água no interior dos tubos, sendo que todos os restantes parâmetros são mantidos.

No gráfico da Figura 112, é comparada a evolução da temperatura na sonda (22), no caso em que o termobloco tem água no seu interior com o caso real, em que este não possui água. Observa-se que a consideração da existência de água dentro dos tubos, desde o instante inicial, leva a que a sonda de temperatura (22) demore mais 4s a atingir os 100°C. Isto deve-se à ocorrência de transferências de calor do termobloco para a água, o que retarda o seu aquecimento.

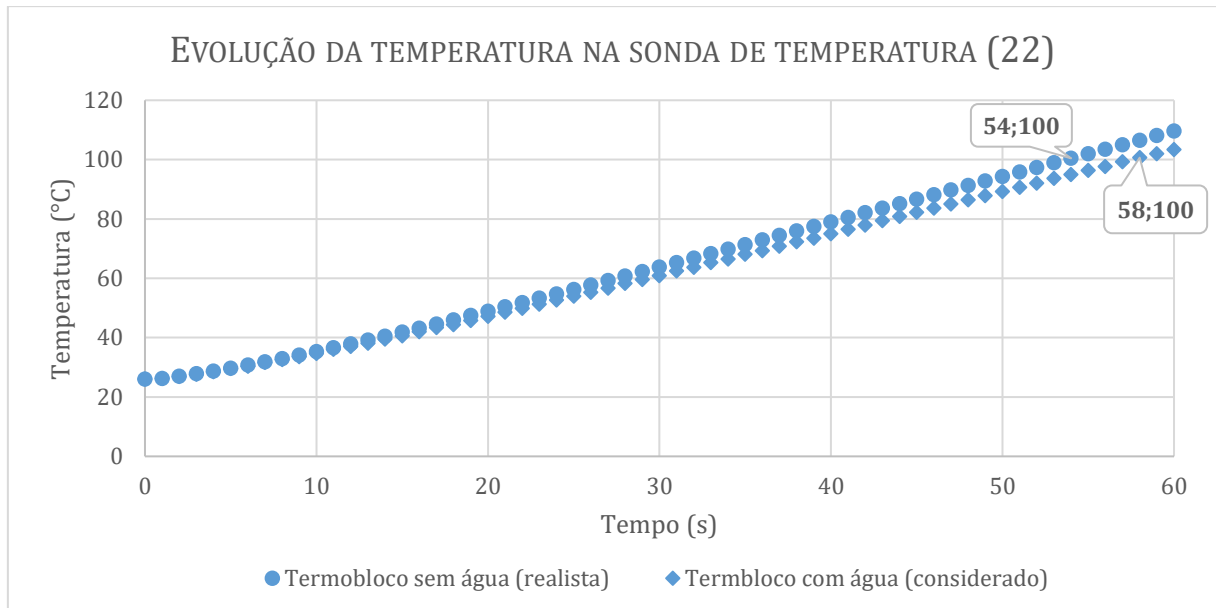


Figura 112 Evolução da temperatura na sonda de temperatura (22) no termobloco sem água e no termobloco com água, durante 60s da simulação, com indicação do instante em que cada uma atinge os 100°C.

O gráfico da Figura 113 apresenta a evolução das temperaturas de cada um dos pontos de interesse, ao longo do tempo definido para a simulação (100s), quando o termobloco não possui água no seu interior.

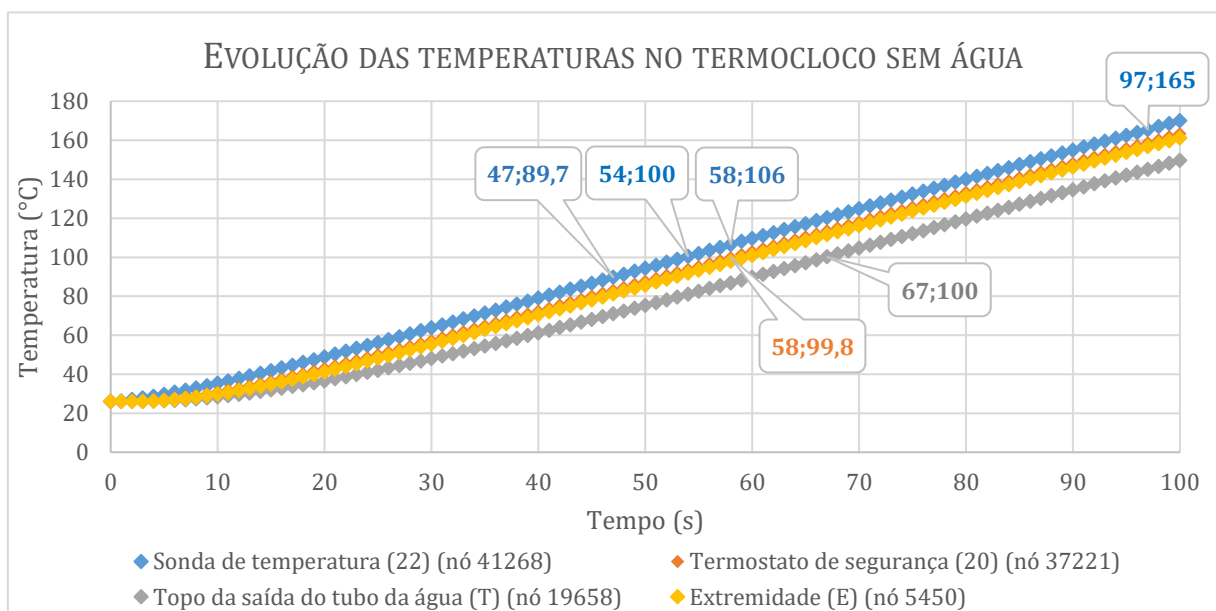


Figura 113 Evolução das temperaturas dos nós em análise, ao longo dos 100s da simulação, quando o termobloco não possui água no seu interior.

Nos primeiros 60s da simulação verifica-se que o modo como se dá a evolução das temperaturas, em cada ponto, acontece de forma semelhante ao caso em que o termobloco tem água no seu interior (Figura 100), sendo que a sonda (22) é a que possui um aquecimento mais rápido e que o topo da saída do tubo da água (T) é o que possui um aquecimento mais lento. Tal acontece porque todos os parâmetros relativos à geometria, aos materiais considerados e à localização dos pontos são mantidos.

Assim, todos os pontos partem da temperatura ambiente (26°C) e aquecem continuamente até que o aquecimento seja interrompido. Neste caso, a sonda de temperatura (22) atinge os 100°C, por volta dos 54s, sendo que a água pode começar a circular em qualquer instante compreendido entre os 47s (quando a sonda (22) deteta os 90°C) e os 58s (quando a sonda (22) deteta os 106°C). Uma vez findo este intervalo, e caso a resistência não desligue, o aquecimento do termobloco prossegue até aos 97s, momento que a sonda de temperatura (22) atinge os 165°C. Caso não existisse um controlo do aquecimento do termobloco, este continuaria a aquecer por tempo indeterminado enquanto a resistência estivesse ligada. O ponto de fusão da liga A336 do termobloco ocorre entre os 540 e os 570°C [67].

A localização da sonda de temperatura (22) no termobloco também é importante, pois a maior ou menor rapidez com que os pontos indicados atingem uma determinada temperatura, está relacionada com a posição de cada um no termobloco e com a sua maior ou menor proximidade à resistência (fonte de calor).

Se a sonda se encontrasse na zona do termostato de segurança (20), como aconteceria, caso não tivesse sido alterada pelos técnicos da *BICAFÉ®*, isto implicaria um atraso em 4s, até esta detetar, aproximadamente, os 100°C e se dar o início da circulação da água no seu interior (gráfico da Figura 113). No entanto, é de salientar que a troca da sonda de temperatura (22) do seu local original para o novo local implica, também, que a temperatura do tubo à saída (T) reduza dos 87°C (no instante $t=58s$, quando o termostato (20) atinge os 100°C) para os 81°C ($t=54s$, quando a sonda (22) atinge os 100°C), o que pode ter um impacto na temperatura final da água e, consequentemente, na qualidade do café obtido.

Já a medição da temperatura no topo da saída do tubo da água, embora permita, à partida, uma medição mais exata da temperatura da água à saída, representa um aumento de 13s para se atingirem os 100°C, pois, de acordo com o gráfico da Figura 113, este só atinge esta temperatura por volta dos 67s.

4.4.4 Notas finais

As críticas mais apontadas pelos técnicos da *BICAFÉ®*, em relação ao funcionamento do termobloco, prendem-se com o facto de este demorar relativamente algum tempo a aquecer (60-90s) sendo que, por vezes, o café sai a temperaturas relativamente baixas (70-80°C).

Em relação ao tempo que este leva a aquecer, os resultados obtidos na simulação da secção 4.4.3.2, indicam que a sonda de temperatura (22) demora cerca de 54s a atingir os 100°C. No entanto, é importante referir que as simulações decorrem num ambiente onde as condições definidas ocorrem de modo ideal, por isso é provável que, na realidade, a sonda (22) leve mais tempo a atingir as mesmas temperaturas. Desde logo, na definição das condições fronteira na secção E6, desprezaram-se outros tipos de perdas de calor que, na realidade, vão retardar o aquecimento do termobloco e provocar, em fases posteriores, o seu arrefecimento mais rápido.

A realização da simulação com o pressuposto de que água existia no interior do termobloco, vem demonstrar que, efetivamente, com esta solução construtiva e com os parâmetros envolvidos, o sistema não poderia funcionar assim, já que, após o início da circulação da água, esta chegaria à saída em temperaturas superiores a 120°C, ou seja, muito provavelmente, já se teria formado vapor. Também é importante referir que, nesta simulação, não se considerou que a resistência desliga no instante que a água começa a circular, o que leva a que as temperaturas do termobloco, dos tubos e da água continuem a aumentar indefinidamente.

Como no caso real, numa situação de funcionamento normal, a resistência é desligada durante a circulação da água, é provável que as temperaturas finais obtidas para água sejam

bastante inferiores, porque o termobloco começa a perder calor, sem receber energia que compense esta perda. Em particular, com o início da circulação da água que entra no tubo, à temperatura ambiente, é expectável que a temperatura do tubo diminua mais rapidamente, sobretudo, no patamar inferior, tal como é verificado na secção 4.4.3.1 (Figura 106). Note-se, ainda, que após sair do termobloco, a água ainda tem que percorrer o interior do grupo de extração, para comprimir a cápsula e tirar o café, sendo que vai perdendo energia durante o percurso, até chegar à chávena. Por todas estas razões, parece possível que o café final seja obtido entre 70-80°C, como referido pelos técnicos, pelo que se propõem várias técnicas para minimizar as perdas de calor e para acelerar o seu aquecimento.

Uma das propostas passaria pela simulação térmica de um termobloco, com a mesma geometria e o mesmo fluxo de calor, mas com um material diferente. No entanto, consultando o *CES Edupack®*, verifica-se que as ligas de alumínio são as que apresentam uma melhor relação entre as propriedades térmicas e preço por unidade de volume. Para decidir em relação à utilização de outros materiais é, então, necessário considerar um conjunto de fatores, desde as suas propriedades térmicas (como a condutividade térmica), ao custo da matéria-prima e, também, ao posterior processo de fabrico a utilizar.

A alternativa mais interessante passa, talvez, pela adaptação da geometria do termobloco. No decorrer da simulação, observa-se que, na geometria atual, existe uma grande parte do termobloco, nomeadamente, nas extremidades, onde se encontra o ponto (E) (Figura 97), que fica sempre a temperaturas inferiores, em comparação com as restantes (por se encontrar mais afastada da resistência). Embora possa parecer que este volume adicional de material não tem uma ação direta na eficiência do termobloco, pensa-se que a sua existência seja uma forma de tentar reter algum calor.

Assim, propõe-se uma otimização desta geometria, mantendo-se o volume total de matéria, para as mesmas propriedades do material e para o mesmo fluxo de calor. Uma sugestão passaria pela simulação térmica do aquecimento do termobloco com uma geometria mais cilíndrica, que cresça radialmente em torno da resistência para que a distribuição radial das temperaturas seja mais uniforme, o que, à partida, também facilitaria a medição da temperatura. É importante referir que, qualquer que seja a geometria pensada, é sempre necessário ter em consideração as restrições comuns impostas pelos processos de fabrico tradicionais.

A possibilidade de efetuar a medição da temperatura em outros locais também pode ser estudada, pois, como foi observado nos resultados obtidos, a maior ou menor rapidez, bem como a maior precisão na medição da temperatura da água (a temperatura determinante para a qualidade do café), depende do local onde esta é medida. Eventualmente, a temperatura poderia ser medida diretamente na água.

Independentemente da solução que venha a ser adotada, podem sempre utilizar-se revestimentos para envolver os termoblocos e evitar perdas de calor.

5 Desenvolvimento do protótipo funcional com os componentes originais

Este projeto da *BICAFÉ®* foi dividido, no plano de tarefas, em duas fases principais: uma fase de desenvolvimento do protótipo funcional, com os componentes originais da máquina fornecida e, uma segunda fase, em que se pretende o desenvolvimento de um protótipo funcional, com os principais componentes fabricados em Portugal.

Os tópicos que seguem são referentes aos trabalhos desenvolvidos, até à data de conclusão desta dissertação. Estes dizem respeito, apenas, à primeira fase de desenvolvimento de um protótipo com os componentes existentes e o procedimento adotado segue as etapas comuns do desenvolvimento integrado de um produto. De entre todas as etapas realizadas, os trabalhos da dissertação desenrolaram-se, sobretudo, na fase de projeto de sistemas, onde se faz a proposta de um circuito adaptado para o protótipo, embora se tenha feito esforço por acompanhar os desenvolvimentos efetuados, em simultâneo, pelas restantes equipas.

5.1 *Design* industrial do produto

Nesta fase, existe uma preocupação em reunir informação útil à definição das especificações gerais da nova máquina, para se criar a primeira arquitetura geral (5.1.1). Tal é conseguido com base no estudo detalhado da máquina atual e na identificação das principais necessidades dos consumidores e dos técnicos da *BICAFÉ®*.

No entanto, o *design* geral definido no final destas fases é sucessivamente adaptado, em função dos trabalhos desenvolvidos no projeto mecânico da máquina (5.1.2), até se obter o *design* detalhado da mesma. Neste momento, a fase de projeto mecânico ainda se encontra em desenvolvimento.

5.1.1 Desenvolvimento de conceitos e do *design* geral

No capítulo 3 fez-se o estudo da arquitetura geral da máquina atual dupla de unidades da *BICAFÉ®*, essencial para compreender o seu funcionamento (secção 3.2) e para identificar os seus principais componentes, de acordo com os seus dois módulos funcionais (secção 3.1).

Com base neste estudo, e tirando partido da arquitetura dos sistemas da máquina atual, desenvolveu-se um conceito que defende a noção de modularidade, pela criação de três módulos distintos que podem ser usados em separado, ou de forma combinada, para constituir a nova máquina. Estes módulos são o módulo principal de extração, para a preparação do café, o módulo de extração de vapor e água quente, para a preparação de outras bebidas, e o módulo dispensador de cápsulas, no qual estão guardadas as cápsulas que o utilizador pode usar (Figura 114).

Trata-se de uma solução versátil, não só para o cliente, mas, também, para a *BICAFÉ®*. O primeiro pode adquirir, apenas, os módulos que necessita e criar uma máquina personalizada, com um número e tipo de módulos diversificado. Para a *BICAFÉ®* é positivo, sobretudo, do ponto de vista estratégico, já que pode criar e vender máquinas com diferentes volumes e para diferentes mercados, sem grandes custos adicionais, pela simples combinação dos diversos módulos.

Por fim, era necessário definir um conceito base para o *design* da máquina, que se enquadrasse com a visão futurista e tecnológica que se pretende desenvolver, que pudesse ser harmonioso para qualquer ambiente em que a máquina venha ser utilizada e que acompanhasse as últimas tendências do ponto de vista estético, sem comprometer as suas funcionalidades e a sua versatilidade. Assim, a grande inspiração para o aspeto estético da máquina, surgiu do *iPhone*, criando-se uma frente plana, com livre acesso às diversas funções disponíveis num ecrã tátil (Figura 114).

Na Figura 114 é apresentada uma modelação em *SolidWorks*® [60], efetuada pelo *Design Studio* da FEUP, da versão mais atual do *design* geral da máquina, com as respetivas dimensões.

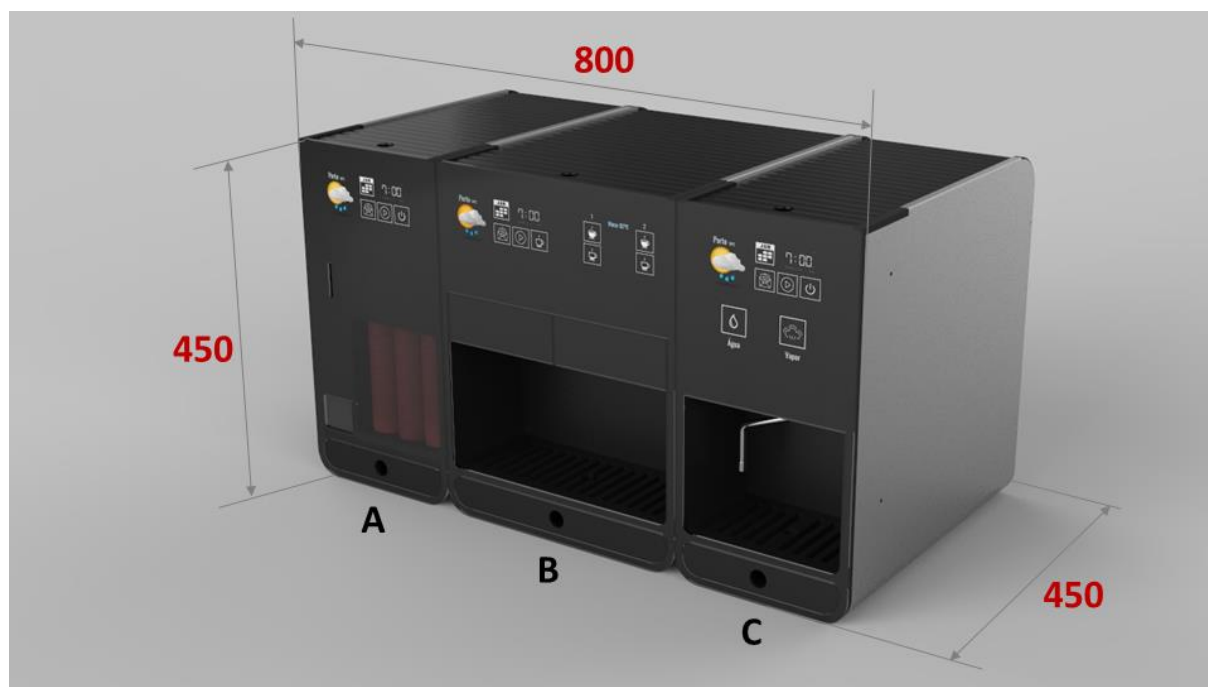


Figura 114 Modelação em *SolidWorks*® [60], da versão mais recente do *design* geral da máquina, com a indicação das suas principais dimensões e com a identificação dos seus módulos: A) Módulo dispensador de cápsulas, B) Módulo de extração de café com dois grupo e C) Módulo de extração de vapor de água e água quente – adaptado de [79].

A ideia é que todos os comandos sejam digitais, pelo que, na frente de cada módulo, no topo, existe um ecrã tátil onde são observáveis as diversas funcionalidades. Enquanto esta frente está pensada para ser em vidro ou acrílico (as especificações são estudadas para perceber se este interfere no tato), as laterais são em alumínio, disponível em diferentes cores, para que cada consumidor possa personalizar a sua máquina. Pretende-se que estas laterais tenham um modo de desmontagem facilitado (por exemplo, transladando para trás), para permitir o fácil e rápido acesso ao interior da máquina, durante os processos de manutenção.

No módulo dispensador de cápsulas (A), estuda-se a necessidade de colocar uma moeda, um cartão ou de aceder a uma aplicação, para que se possa retirar uma cápsula, caso a máquina seja utilizada em escritórios ou ambientes onde o café é pago. No topo deste módulo existe uma persina que, quando aberta, dá acesso a um espaço de arrumação adicional onde se podem colocar, por exemplo, caixas de cápsulas.

Nos módulos de extração de café (B) e de extração de vapor de água e água quente (C), também existe uma persina no topo que, nestes casos, dá acesso a uma plataforma superior, aquecida por uma resistência, onde se podem arrumar e aquecer as respetivas chávenas. Como o espaço deixado para a introdução das chávenas tem que permitir que as de maiores dimensões

caibam no seu interior, está a ponderar-se a criação de um patamar que permita o ajuste da altura das de tamanhos menores. Em baixo, existe uma gaveta para recolher as cápsulas usadas.

No caso do módulo central é importante salientar que este possui dois grupos de extração, pelo que também possui duas gavetas para a introdução das cápsulas. Idealmente, estas gavetas possuem um sistema para controlar a sua velocidade de abertura e fecho, pois, como foi referido na secção 3.1.2, é frequente encontrar danos nas mesmas, devido ao uso excessivo de força.

Por fim, a máquina pode existir com ou sem fundo. O propósito da existência de uma máquina sem fundo é o de facilitar a limpeza, pois, geralmente, existem sempre grandes quantidades de resíduos retidos no interior.

Para além da máquina desenvolveu-se, ainda, um carrinho para que a mesma possa ser transportada mais facilmente, sobretudo, em eventos especiais. Este possui uma bateria para se poder mover de forma autónoma e um conjunto de prateleiras de armazenamento. No topo deste carrinho, existe um orifício por onde as cápsulas usadas da máquina (sem fundo) caem, em direção a um caixote de lixo existente no seu interior. Na Figura 115 a) é apresentado o carrinho com as suas dimensões e com a máquina e na Figura 115 b) é possível observar a constituição do mesmo.

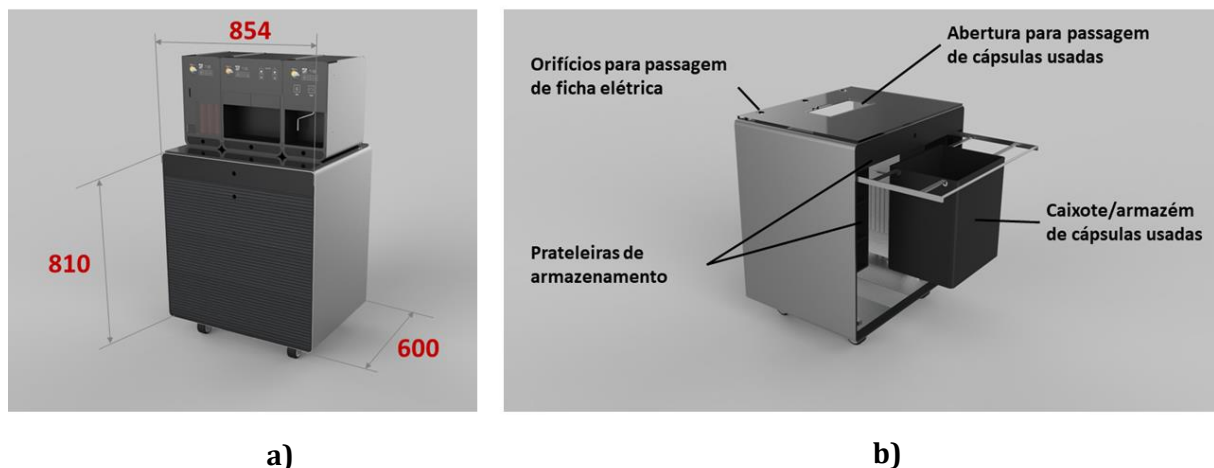


Figura 115 Modelação do carrinho em *SolidWorks*® [60] – adaptado de [79]: a) conjunto do carrinho com a máquina e com indicação das dimensões do mesmo; b) carrinho com identificação de alguns dos seus principais detalhes.

Embora o conceito da máquina sugira a existência de três módulos funcionais distintos, o projeto está a ser centralizado, nesta fase inicial, no desenvolvimento do módulo central de extração de café. Assim, todos os tópicos que se seguem são referentes, apenas, ao projeto deste módulo.

5.1.2 Aspetos gerais do projeto mecânico

As principais preocupações nesta fase são o projeto de acabamentos e remates dos elementos envolventes, o que tem impacto no tipo de chapas, persianas, vidro ou acrílico a utilizar no exterior e o projeto de execução estrutural, no qual se projetam elementos de suporte e os modos de fixação dos componentes mecânicos, elétricos e eletrónicos da máquina.

Neste momento, os trabalhos realizados ainda se encontram numa fase inicial. No entanto, tentam-se reduzir os custos de produção, apostando-se na conceção de estruturas envolventes em chapa e produzindo-se, apenas, um reduzido número de peças em plástico e em injeção. Também é procurada a uniformização do tamanho e da forma destas peças, para se evitarem custos

adicionais relacionados com a conceção de moldes diferentes, já que se vão produzir séries de peças relativamente pequenas.

A volumetria da máquina também é uma preocupação, já que, o conceito inicial foi desenvolvido com base nas dimensões dos componentes existentes na máquina fornecida e, entretanto, na fase de projeto de sistemas (secção 5.2), optou-se por alterar alguns destes componentes. As dimensões apresentadas na Figura 115 já têm em consideração estas alterações. Alerta-se, todavia, que este é um parâmetro sujeito a sucessivas modificações em função dos desenvolvimentos do projeto.

A volumetria deve atender, não só, aos componentes que estão no seu interior, mas, também, aos aspetos ergonómicos, permitindo o uso confortável da mesma, por parte de pessoas de diversas estaturas e tendo em consideração as normas e as dimensões que são usualmente utilizadas no projeto de espaços interiores.

5.2 Projeto de sistemas

5.2.1 Adaptação de componentes e circuitos

Nesta fase tem-se em consideração os conhecimentos recolhidos no estudo efetuado no capítulo 3 e algumas informações fornecidas pelos técnicos da *BICAFÉ®*, para se adaptar o circuito hidráulico inicial, ao módulo de extração da nova máquina.

A partir do circuito hidráulico obtido para a máquina fornecida pela *BICAFÉ®* (Figura 46, na secção 3.2.1) é possível isolar a parte do circuito referente à extração do café. No entanto, como se optou por alterar alguns dos seus componentes, foi necessário efetuar algumas alterações neste circuito, sendo que o resultado obtido se encontra na Figura 116.

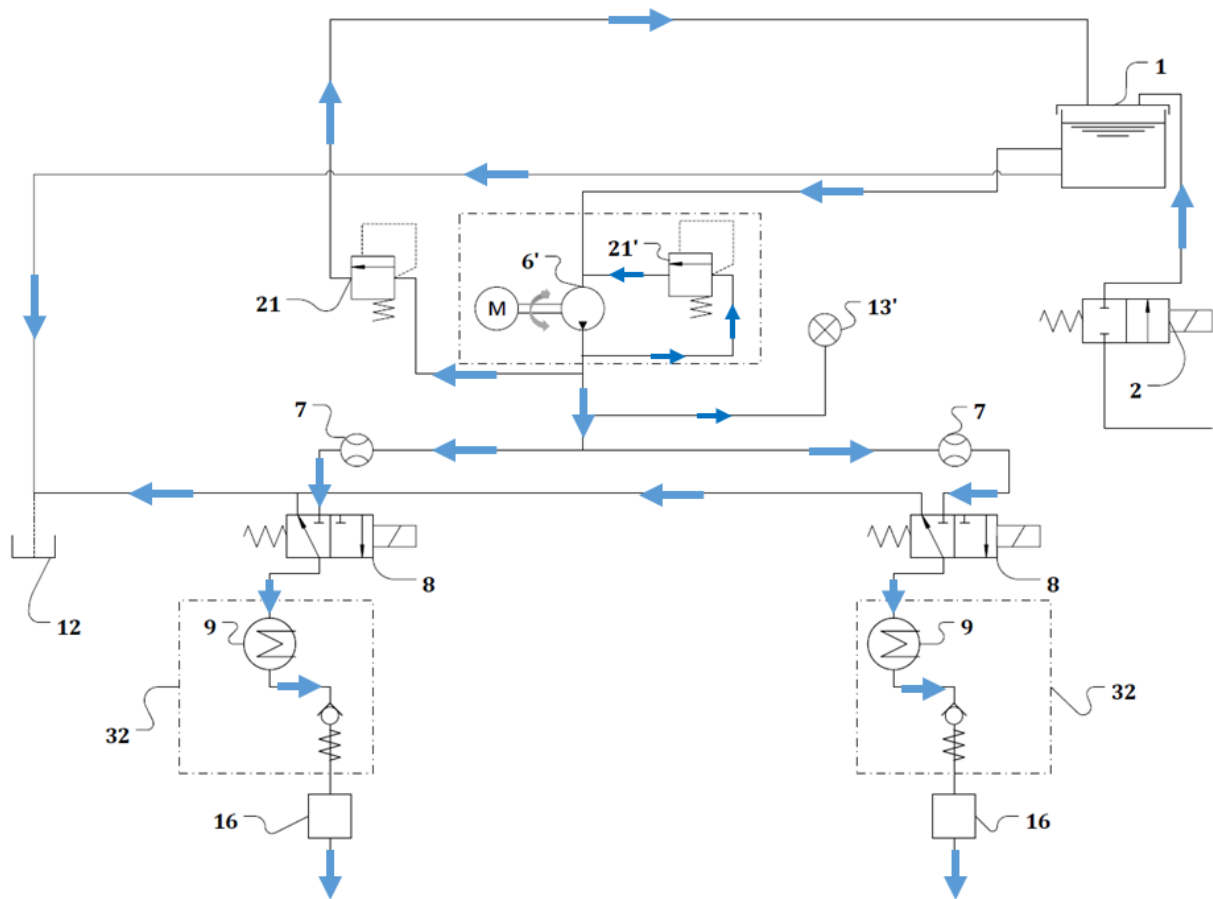


Figura 116 Circuito hidráulico adaptado para o módulo do grupo de extração da nova máquina.

As alterações passam pela substituição das duas bombas dos grupos (6) por uma única bomba rotativa (6') e pela conseqüente remoção de uma das válvulas limitadoras de pressão (21). Optou-se por este tipo de bombas, pois pensa-se que assim se consegue um maior controlo entre a pressão e o volume debitado e, conseqüentemente, um maior controlo da velocidade de funcionamento do grupo de extração.

Tal como referido na secção 2.4.2, onde se faz uma abordagem acerca dos vários tipos de bombas, verifica-se que as bombas rotativas são acompanhadas por um motor (M) e por uma válvula limitadora de pressão (21') em *bypass*, cujo objetivo é proteger o circuito contra a possibilidade de ocorrência de picos pressões, para além dos definidos. No entanto, não é apropriado utilizar esta válvula como reguladora do fluxo do circuito, pelo que se acrescenta uma válvula limitadora de pressão (21), a jusante da bomba (6'), mas antes dos contadores volumétricos (7), para se efetuar o controlo da pressão no circuito, antes de água chegar a cada grupo. Também é acrescentado um manómetro (13') para se monitorizar a pressão.

A bomba de rotação selecionada para implementar no módulo é a bomba rotativa da série PO 70-400, produzida pela *Fluid-o-Tech*® e comercializada pela marca *Rotoflow*®. A sua pressão estática máxima de funcionamento é de 20bar, a velocidade de rotação máxima é de 1725rpm e o seu peso varia entre 1.1 e 1.3kg [80]. No catálogo [80] é possível encontrar algumas informações adicionais acerca da bomba, como as suas principais dimensões e os gráficos que, para determinadas velocidades de rotação, indicam a variação de caudal para diferentes pressões, verificando-se que este reduz ligeiramente, em pressões mais elevadas.

Em relação ao motor para a bomba, escolheu-se um motor com 150/300W e 1400rpm, em [81].

Na Figura 117 observam-se o motor e a bomba escolhidos para a nova máquina, quando estes estão acoplados.



Figura 117 Conjunto motor e bomba rotativa selecionados para a nova máquina.

Embora a bomba não tenha dimensões relativamente grandes, o mesmo não se verifica para o motor, o que deu a origem a alguns ajustes nas dimensões iniciais previstas para a máquina, até se obterem, provisoriamente, as dimensões apresentadas na Figura 114.

5.2.2 Projeto e montagem de uma bancada de testes

No sentido de se efetuarem testes funcionais dos diversos circuitos, projetou-se e montou-se uma bancada de testes. Nesta, pretendem-se montar todos os componentes dos circuitos hidráulico e elétrico e detetar eventuais falhas no funcionamento dos mesmos.

Neste momento, estão montados praticamente todos os componentes do circuito hidráulico da Figura 116, à semelhança do que se observa na Figura 118. O próximo passo passa pela incorporação dos circuitos elétrico e eletrónico.

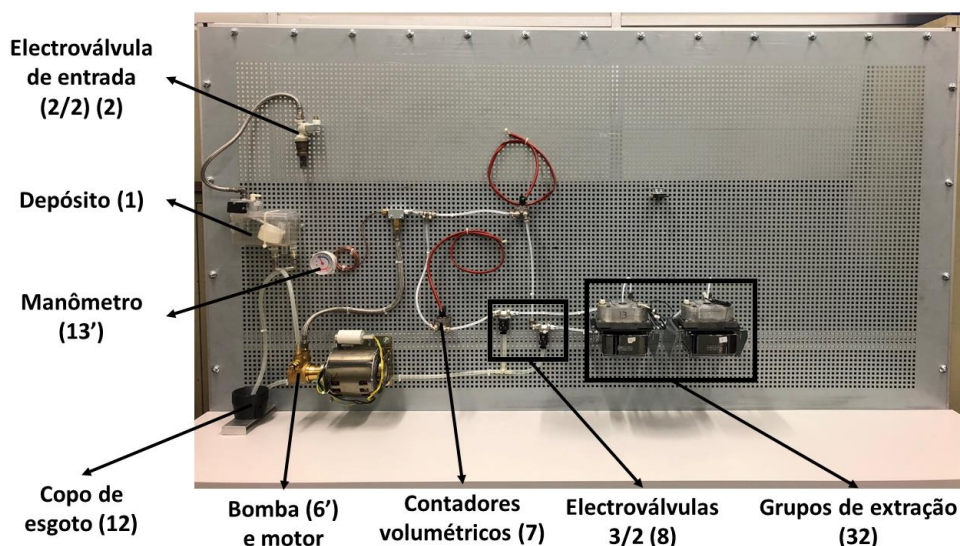


Figura 118 Bancada de testes com o circuito hidráulico adaptado, praticamente montado.

5.3 Modelação provisória do protótipo

Na Figura 119 encontra-se uma modelação, efetuada pelo INEGI® em *SolidWorks*® [60], do protótipo do módulo do grupo de extração, que se pretende desenvolver. Como os trabalhos de projeto mecânico ainda não estão terminados, a modelação apresentada também não está completa. No entanto é possível ter uma ideia da disposição dos componentes do circuito hidráulico da Figura 116, no módulo.

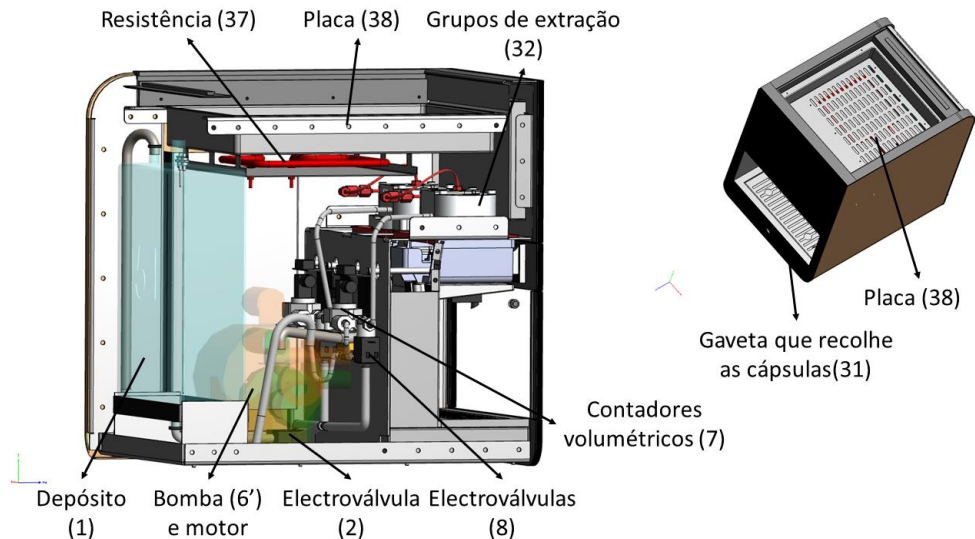


Figura 119 Modelação primordia, em *SolidWorks*® [60], do protótipo do módulo de extração de café da nova máquina – adaptado de [82].

5.4 Desenvolvimento de cápsulas biodegradáveis

Em simultâneo com o desenvolvimento da máquina, também já se iniciou o processo de escolha de materiais biodegradáveis para conceber cápsulas que possam ser tratadas por compostagem. Os materiais são da *ecovio*®, sendo que o catálogo utilizado é o [83]. Neste encontram-se várias informações relativas às principais propriedades mecânicas e térmicas dos materiais, às suas principais aplicações, sendo que a maioria são na indústria alimentar, e às considerações a ter nos processos de injeção dos mesmos. Uma vez selecionado o material, é necessário testá-lo, para avaliar as pressões de rebentamento das cápsulas, na máquina.

Também se estão a efetuar testes a diferentes materiais a utilizar na película da cápsula, com o objetivo de avaliar a sua eficácia na preservação das propriedades do café, pela medição da quantidade de oxigénio que se infiltra no interior da mesma, ao fim de um determinado período de tempo.

6 Conclusões e trabalhos futuros

O presente projeto visa o estudo e caracterização do grupo de extração de uma máquina de café dupla de unidades, com o objetivo de se proporem soluções para tentar otimizar a qualidade e a rapidez do café a obter. Este capítulo faz referência às conclusões retiradas deste estudo e propõe trabalhos a serem desenvolvidos futuramente, com base nos resultados obtidos.

6.1 Conclusões

Em relação aos objetivos que foram propostos inicialmente, considera-se que o projeto foi concluído com sucesso.

Inicialmente, efetuou-se um estudo detalhado dos componentes da máquina de café, tendo-se procedido ao levantamento dos seus circuitos de funcionamento (capítulo 3). Estas tarefas permitiram perceber que máquina pode ser dividida, do ponto de vista funcional, em dois módulos principais: o módulo de extração de vapor de água e água quente e o módulo de extração de café. A unidade de aquecimento do módulo de vapor e água é a caldeira e do módulo de extração é o termobloco.

Em seguida, no capítulo 4, faz-se a análise detalhada do grupo de extração, pertencente ao módulo de extração. Este corresponde ao grupo de componentes diretamente relacionados com o aquecimento da água do café e com a fixação e compressão da cápsula. A fixação e a compressão da cápsula ocorrem quando a água exerce uma força suficiente para vencer a força da mola do êmbolo, sendo que a água escorre para a chávena, quando a pressão exercida é suficiente para comprimir a mola da válvula de retenção simples (Figura 55). Este mecanismo, baseado num equilíbrio de forças, provoca o desgaste de alguns dos componentes, também, pelo contacto direto dos mesmos com a água. Para ser possível a sua completa análise, o grupo foi desmontado, modelado e estudado do ponto de vista metalográfico e térmico.

No que respeita à análise metalográfica, conseguiu-se a caracterização detalhada de cada um dos constituintes do grupo de extração, pela realização de análises microscópicas, medições de dureza e massa volúmica e pela determinação da sua composição química. Por fim, foi possível encontrar uma liga normalizada para o fabrico de cada um.

A análise metalográfica dos termoblocos de três máquinas distintas (secção 4.3.1), permite concluir que o *design* e a solução construtiva adotados em cada caso, são determinantes para a maior ou menor formação de defeitos nas peças fundidas (porosidade), o que pode influenciar a sua eficiência térmica, ao passo que a composição química das suas ligas é bastante semelhante (ligas praticamente binárias, de Al-Si). Em particular, o termobloco da máquina em estudo é produzido pela liga A336, de acordo com a *Aluminum Association*, sendo provavelmente obtido, por fundição em coquilha e constituído, no interior, por uma resistência e por tubos para circulação da água, constituídos em aço inoxidável AISI304. O quadro resumo dos resultados obtidos na metalografia, para todos os componentes do grupo, encontra-se na secção 4.3.6 (Tabela 17).

Do ponto de vista da análise térmica do termobloco, verifica-se que o aquecimento ocorre de modo mais rápido, nas zonas mais próximas da resistência, existindo diferenças significativas

entre a temperatura da água e a temperatura dos diversos pontos do termobloco, para o mesmo instante de tempo.

Por exemplo, aos 60s, a temperatura da água no interior já se encontra 4°C acima da temperatura registada pela sonda de temperatura nesse instante (Figura 100 e Figura 105), enquanto a temperatura no exterior já se encontra 14°C acima da mesma (Figura 100 e Figura 106). Isto também sugere a existência de um gradiente de temperaturas, entre o exterior e o interior da massa de água, quando esta está em repouso, que diminui à medida que esta começa a circular (Figura 103 e Figura 104). Ainda neste instante, conclui-se que o material do tubo da água e a sua espessura levam a que a diferença de temperaturas entre o exterior e o interior do tubo (exterior da água) ronde os 4°C, ao passo que entre o exterior do tubo e o interior da água é de 13°C (Figura 111). Observa-se, também, que a temperatura da parte do tubo que está no interior do termobloco é 36 °C superior à registada na sua extremidade, no exterior do termobloco (Figura 100 e Figura 111).

Assim, o local onde se efetuam as medições de temperatura pode ter um impacto significativo na precisão da leitura que se faz de água (o que influencia a qualidade do café) e, conseqüentemente, na rapidez do funcionamento do grupo de extração. Verifica-se, também, que a sonda de temperatura demora cerca de 54s a atingir os 100°C, caso se considere que não existe água desde o instante inicial da simulação, sendo que este valor aumenta para 58s, caso se considere a existência de água (Figura 112).

Por fim, no capítulo 5, é efetuada uma abordagem ao estado atual das atividades realizadas no protótipo funcional da máquina, tendo sido efetuada uma proposta para o circuito a implementar. Este faz adaptação do circuito original, substituindo as duas bombas de vibração iniciais pela bomba rotativa, com os devidos ajustes necessários (Figura 116, secção 5.2.1).

6.2 Trabalhos futuros

Sendo este um projeto que ainda se encontra numa fase inicial e sendo esta a primeira dissertação de engenharia a abordar o tema, ainda existem muitos trabalhos futuros que podem ser realizados, com vista a testar outros parâmetros importantes. Como do ponto de vista metalográfico o grupo já está perfeitamente caracterizado, sugerem-se, sobretudo, trabalhos relacionados com a análise térmica.

Em primeiro lugar, propõe-se a realização da simulação completa, sem consideração da água no interior do termobloco, desde o instante inicial, para perceber quais são as temperaturas finais obtidas para água.

Em segundo lugar, sugere-se a realização de uma série simulações com vista a testar a influência de diversos parâmetros, no aquecimento do termobloco, nomeadamente:

- testar a rapidez e a precisão do aquecimento, pela alteração da geometria do termobloco, mantendo-se os restantes parâmetros;
- testar a influência das propriedades do material do termobloco no seu aquecimento, pela adoção de um material distinto mantendo-se os restantes parâmetros. Para tal é necessário avaliar, cuidadosamente, se existe um material cujas propriedades térmicas e o custo da matéria-prima compensem a substituição do atual;
- testar uma resistência com uma potência diferente e manter os restantes parâmetros.

Para além das propostas anteriores, também se considera pertinente a simulação térmica do grupo de extração total, que contempla o termobloco e os restantes elementos, pois, muito provavelmente, a temperatura à saída do grupo de extração é inferior à que sai do termobloco. Note-se que após sair do termobloco, a água ainda tem que percorrer todo o interior do grupo e comprimir a cápsula, antes de chegar à chávena.

Também seria interessante efetuar uma análise de forças, no sentido de averiguar a pressão que água tem que exercer no interior do grupo, para conseguir vencer a força da mola do êmbolo e da mola da válvula de retenção simples (Figura 55, na secção 4.2). Desta forma, conseguia-se avaliar vários aspetos relacionados, por exemplo, com o desgaste dos diversos componentes do grupo e com o tempo que a água do café leva, desde que sai do termobloco, até chegar ao fim do grupo, prevendo-se o tempo total de tiragem de um café.

Como a gaveta do grupo, onde se colocam as cápsulas, regista alguns problemas de desgaste e fratura, seria útil realizar testes ou análises estruturais da mesma.

Por fim, propõe-se o projeto de um grupo de extração, com um conceito completamente distinto do estudado, no qual não existam tantos componentes sujeitos a desgaste prematuro e com o qual se consiga um melhor controlo dos parâmetros envolvidos.

7 Referências bibliográficas

- [1] I. C. Organization, «World coffee consumption», 2017.
- [2] Grande Consumo, «O QUE MUDOU NO CONSUMO DO CAFÉ EM PORTUGAL?», 2016. [Em linha]. Disponível em: <http://www.grandeconsumo.com/noticia/7030/o-que-mudou-no-consumo-do-cafe-em-portugal>. [Acedido: 26-Set-2017].
- [3] P. Araújo, «Café é um vício que vale milhões de euros», *Dinheiro Vivo*, 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://www.dinheirovivo.pt/fotogaleria/galeria/cafe-e-um-vicio-que-vale-milhoes-de-euros/>. [Acedido: 26-Set-2017].
- [4] L. BICAFÉ – TORREFACÇÃO E COMÉRCIO DE CAFÉ, «Quem somos - Bicafé Cápsulas», 2016. [Em linha]. Disponível em: <https://www.bicafecapsulas.com/pt/quem-somos/>. [Acedido: 17-Fev-2018].
- [5] Simulia, «Abaqus». Dassault Systèmes, 2016.
- [6] D. Hoyt e J. McMillan, *The Global Coffee Trade*. 2004, p. 24.
- [7] J. Sachs, J. Rising, T. Foreman, J. Simmons, e M. Brahm, «Climate change in the coffee belt», *The impacts of climate change on coffee: trouble brewing*, p. 15, 2015.
- [8] T. Benmetan, «The Coffee Belt, A World Map of the Major Coffee Producers», 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://seasia.co/xhr/render/article/beyond/300-young-people-who-are-changing-our-world/1492680969/1>. [Acedido: 21-Out-2017].
- [9] I. C. Organization, «Total production by all exporting countries», 2017.
- [10] P. Lourenço, «Venda de cápsulas de café bate recorde em 2016», *Jornal de Notícias*, 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://www.jn.pt/economia/interior/venda-de-capsulas-de-cafe-bate-recorde-em-2016-5721557.html>. [Acedido: 26-Set-2017].
- [11] Tiago Oliveira, «Uma nova era: Culto do café», 2011. [Em linha]. Disponível em: <https://cultodocafe.wordpress.com/reportagem/>. [Acedido: 01-Nov-2017].
- [12] S. I. Mussatto, E. M. S. Machado, S. Martins, e J. a. Teixeira, «Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues», *Food Bioprocess Technol.*, vol. 4, n. 5, pp. 661–672, 2011.
- [13] T. Viere, J. von Enden, e S. Schaltegger, «Life Cycle and Supply Chain Information in Environmental Management Accounting: A Coffee Case Study», em *Eco-Efficiency in Industry and Science vol.27: Environmental Management Accounting and Supply Chain Management*, R. L. Burritt, S. Schaltegger, M. Bennett, T. Pohjola, e M. Csutora, Eds. Springer, Dordrecht, 2011, pp. 23–40.
- [14] A. Tukker, «Sustainable Consumption by Certification: The Case of Coffee», em *Sustainable Production Consumption Systems*, L. Lebel, S. Lorek, e R. Daniel, Eds. Springer, Dordrecht, 2010, pp. 184–204.
- [15] Fairtrade Foundation, «Coffee farmers», 2017. [Em linha]. Disponível em: <http://www.fairtrade.org.uk/Farmers-and-Workers/Coffee>. [Acedido: 29-Out-2017].
- [16] Fairtrade Foundation, «About Coffee», 2017. [Em linha]. Disponível em: <http://www.fairtrade.org.uk/en/farmers-and-workers/coffee/about-coffee>. [Acedido: 29-Out-2017].
- [17] S. Fetzek, «THE COFFEE BELT», em *Epicenters of climate and security: the New Geostrategic Landscape of the Anthropocene*, 2017, n. June, p. 139.
- [18] P. T. M. Ingenbleek e M. J. Reinders, «The Development of a Market for Sustainable Coffee in The Netherlands: Rethinking the Contribution of Fair Trade», *J. Bus. Ethics*, vol. 113, n. 3,

- pp. 461–474, 2013.
- [19] I. O. for Standardization, «ISO 14040:2006 - Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework», 2016. [Em linha]. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/37456.html>. [Acedido: 30-Out-2017].
- [20] I. O. for Standardization, «ISO 14044:2006 - Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines», 2016. [Em linha]. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/38498.html>. [Acedido: 30-Out-2017].
- [21] M. F. Ashby, «The materials life cycle», em *Materials and the Environment, Eco-Informed Material Choice*, Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2009, pp. 39–63.
- [22] Salomone, «Life cycle assessment applied to coffee production: investigating environmental impacts to aid decision-making for improvements at company level», *Food, Agric. Environ.*, vol. 1, pp. 295–300, 2003.
- [23] A. Diers, H. Langowski, K. Pannkoke, e R Hop, *Produkt-Ökobilanz vacuumverpackter Röstkaffee*. Bayreuth: Eco-Informa Press, 1999.
- [24] C. A. Salamanca, N. Fiol, C. González, M. Saez, e I. Villaescusa, «Extraction of espresso coffee by using gradient of temperature. Effect on physicochemical and sensorial characteristics of espresso», *Food Chem.*, vol. 214, pp. 622–630, 2016.
- [25] M. Petracco, «Technology IV: Beverage Preparation: Brewing Trends for the New Millennium», em *COFFEE Recent Developments*, R. J. Clarke e O. G. Vitzthum, Eds. Blackwell Science Ltd, 2001, pp. 140–164.
- [26] G. Caprioli *et al.*, «Optimization of espresso machine parameters through the analysis of coffee odorants by HS-SPME-GC/MS», *Food Chem.*, vol. 135, n. 3, pp. 1127–1133, 2012.
- [27] L. Bezzera, «Coffee-making machine», US726793 A, 1903.
- [28] Jimmy Stamp, «The Long History of the Espresso Machine», *Smithsonian*, 2012. [Em linha]. Disponível em: <https://www.smithsonianmag.com/arts-culture/the-long-history-of-the-espresso-machine-126012814/>. [Acedido: 05-Nov-2017].
- [29] F. Illy, «Apparecchio per la rapida ed automatica preparazione dell infusion di caffè», 333293/26, 1935.
- [30] J. Nipkow, E. Bush, B. Josephy, e A. Pilone, «For a tasty but efficient coffee», *Eur. Counc. an energy Effic. Econ. eceee Summer Study Proc.*, n. Lot 25, pp. 1453–1460, 2011.
- [31] Koninklijke Philips N.V., «Daily Collection Coffee maker HD7457/20 | Philips». [Em linha]. Disponível em: https://www.philips.co.in/c-p/HD7457_20/daily-collection-coffee-maker. [Acedido: 05-Dez-2017].
- [32] Koninklijke Philips N.V., «Poemia Manual Espresso machine HD8327/47 | Saeco». [Em linha]. Disponível em: https://www.usa.philips.com/c-p/HD8327_47/saeco-poemia-manual-espresso-machine. [Acedido: 05-Dez-2017].
- [33] Coffee Gear at Home, «What Coffee/Espresso Machines Use Nespresso Capsules? | Coffee Gear at Home». [Em linha]. Disponível em: <https://coffeegearathome.com/what-coffeeespresso-machines-use-nespresso-capsules/>. [Acedido: 05-Dez-2017].
- [34] Koninklijke Philips N.V., «Intelial Super-automatic espresso machine HD8753/87 | Saeco». [Em linha]. Disponível em: https://www.usa.philips.com/c-p/HD8753_87/saeco-inteliasuper-automatic-espresso-machine. [Acedido: 05-Dez-2017].
- [35] Matthew Barry, «The Global Coffee Pods Market in 2017: The End of an Era?», *Euromonitor International*, 2017. [Em linha]. Disponível em: <http://blog.euromonitor.com/2017/10/global-coffee-pods-market-2017-end-era.html>. [Acedido: 02-Nov-2017].
- [36] capsulehouse, «THE BEST WAY TO PRESERVE COFFEE?», 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://capsulehouse.coffee/en/faq/the-best-way-to-preserve-coffee/>. [Acedido: 14-Fev-

- 2018].
- [37] Ascaso Factory SLU, «Ascaso Factory | Máquinas de café espresso fabricadas en Barcelona | BAR», 2017. [Em linha]. Disponível em: <http://www.ascaso.com/div-maquinas-molinos-cafe-espresso/bar-5.html>. [Acedido: 08-Dez-2017].
- [38] Samsung, «Samsung Smart Refrigerator: Family Hub Touchscreen Fridge | Samsung US», 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://www.samsung.com/us/explore/family-hub-refrigerator/overview/>. [Acedido: 05-Nov-2017].
- [39] Technavio, «Global Smart Coffee Maker Market 2017-2021 | Market Research Reports - Industry Analysis Size», *Technavio*, 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://www.technavio.com/report/global-general-retail-goods-and-services-global-smart-coffee-maker-market-2017-2021>. [Acedido: 10-Dez-2017].
- [40] SMARTER APPLICATIONS, «Coffee - The connected kitchen - a new way to start your day - Smarter», 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://smarter.am/coffee/>. [Acedido: 17-Dez-2017].
- [41] Electrolux Design Lab, «Interview with Electrolux Design Lab 2012 finalist Wenyao Cai | Electrolux Design Lab», 2012. [Em linha]. Disponível em: <http://electroluxdesignlab.com/en/2012/10/23/interview-with-electrolux-design-lab-2012-finalist-wenyao-cai/>. [Acedido: 17-Dez-2017].
- [42] Nicole Kobie, «What is the internet of things? | Internet of Things - Connected World», *The Guardian*, 2015. [Em linha]. Disponível em: <https://www.theguardian.com/technology/2015/may/06/what-is-the-internet-of-things-google>. [Acedido: 05-Nov-2017].
- [43] Hydro Bio - Clean Living, «Espresso Machines Different Heating Technologies - Hydro Bio - Clean Living», 2017. [Em linha]. Disponível em: <http://hydrobio.org/espresso-machines-different-heating-technologies/>. [Acedido: 01-Out-2017].
- [44] Talk Coffee, «Buying Guide- Espresso machines | Talk Coffee», 2017. [Em linha]. Disponível em: <http://www.talkcoffee.com.au/buying-guide-espresso-machines/>. [Acedido: 19-Dez-2017].
- [45] Crema Coffee Garage Australia, «Boiler Versus Thermal Blocks», 2016. [Em linha]. Disponível em: <https://cremacoffeegarage.com.au/blog/boiler-versus-thermal-blocks>. [Acedido: 01-Out-2017].
- [46] Coffee Machine Technologies, «Heat Exchanger vs Dual Boiler Coffee Machines | Coffee Machine Technologies | Coffee Machines, Grinders, Accessories», 2016. [Em linha]. Disponível em: <http://coffeemachinetechologies.com.au/heat-exchanger-vs-dual-boiler-coffee-machines/>. [Acedido: 20-Dez-2017].
- [47] Seattle Coffee Gear, «What is a thermoblock?», 2012. [Em linha]. Disponível em: <https://www.seattlecoffeegear.com/blog/2012/05/07/what-is-a-thermoblock/>. [Acedido: 02-Out-2017].
- [48] Will O'Brien, «How-To: Mod your espresso machine», 2006. [Em linha]. Disponível em: <https://www.engadget.com/2006/08/08/how-to-mod-your-espresso-machine/>. [Acedido: 21-Dez-2017].
- [49] Billcrossland, «Espresso Machine Vane Pump», 2009. [Em linha]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=LUDEafxPyZQ>. [Acedido: 21-Dez-2017].
- [50] Seattle Coffee Gear, «What's the Difference Between a Rotary and a Vibratory Pump?», 2012. [Em linha]. Disponível em: <https://www.seattlecoffeegear.com/learn/videos-home/ask-the-experts/compare-rotary-v-vibratory-pumps>. [Acedido: 21-Dez-2017].
- [51] Billcrossland, «Espresso machine Vibration Pump 2009», 2012. [Em linha]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=we9IZJ5tQFs>. [Acedido: 21-Out-2017].
- [52] S. Barella, A. Gruttadauria, C. Mapelli, e D. Mombelli, «Anomalous corrosion phenomena

- observed on electrovalves of coffee espresso machines», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 33, pp. 449–456, 2013.
- [53] Ascaso Factory, «Ascaso Factory | Máquinas de café espresso fabricadas en Barcelona | BAR», 2017. [Em linha]. Disponível em: <http://www.ascaso.com/div-maquinas-molinos-cafe-espresso/bar-3.html>. [Acedido: 21-Dez-2017].
- [54] P. A. Ferreira de Abreu e M. R. Quintas, «Sistemas Eletromecânicos», Porto, 2015.
- [55] Vaidehi Shah, «Is the coffee pod craze brewing an environmental disaster?», *Eco-Business*, 2015. [Em linha]. Disponível em: <http://www.eco-business.com/news/is-the-coffee-pod-craze-brewing-an-environmental-disaster/>. [Acedido: 04-Nov-2017].
- [56] M. A. A. Dos Reis, M. D. Martins, P. C. M. Pinto, P. M. R. Pereira, e V. T. D. Duarte, «Como se fazem cápsulas para café?», *Proj. Feup*, p. 34, 2012.
- [57] A. Sholl, «Compostable coffee capsules could become mainstream | Metro News», *Metro.co.uk*, 2017. [Em linha]. Disponível em: <http://metro.co.uk/2017/03/14/these-pods-are-the-future-for-coffee-drinkers-6506819/>. [Acedido: 24-Dez-2017].
- [58] Club Coffee LP, «Compare compostable to recyclable pods», 2015. [Em linha]. Disponível em: <http://purpod100.com/>. [Acedido: 24-Dez-2017].
- [59] BBC, «Is there a serious problem with coffee capsules? - BBC News», 2016. [Em linha]. Disponível em: <http://www.bbc.com/news/magazine-35605927>. [Acedido: 15-Fev-2018].
- [60] SolidWorks Corporation, «SolidWorks». Dassault Systèmes, 2017.
- [61] Ascaso Factory SLU, «Ascaso Factory | Máquinas de café espresso fabricadas en Barcelona | BAR», 2017. [Em linha]. Disponível em: <http://www.ascaso.com/div-maquinas-molinos-cafe-espresso/bar-3.html>. [Acedido: 15-Jan-2018].
- [62] Microsoft Office, «Visio Professional». 2016.
- [63] S. Morais, «Desenho de conjuntos», em *Desenho Técnico Básico*, 23.^a ed., G. Reunidos, Ed. Porto: Porto Editora, 2007, p. 310.
- [64] Ascaso Factory, «Bar Kap». p. 13, 2016.
- [65] ASM International, «Metallographic Techniques and Microstructures», em *Metallography and Microstructures Handbook*, 9.^a ed., K. Mills, J. R. Davis, J. D. Destefani, D. A. Dieterich, G. M. Crankovic, H. J. Frissell, D. M. Jenkins, W. H. Cubberly, R. I. Stedfeld, R. T. Kieपुरa, e B. R. Sanders, Eds. ASM International, 1985, pp. 21–152.
- [66] ASM International, «Nonferrous Molten Metal Process», em *ASM Handbook Volume 15: Casting*, 9.^a ed., D. M. Stefanescu, J. R. Davis, J. D. Destefani, T. B. Zorc, H. J. Frissel, G. M. Crankovic, A. W. Ronke, D. M. Jenkins, K. L. O’Keefe, R. L. Stedfeld, K. M. Mills, L. A. Abel, R. T. Kieपुरa, P. Thomas, e N. D. Wheaton, Eds. ASM International, 1998, pp. 445–496.
- [67] ASM International, «Aluminum and Aluminum Alloys», em *ASM Handbook Volume 15: Casting*, 9.^a ed., D. M. Stefanescu, J. R. Davis, J. D. Destefani, T. B. Zorc, H. J. Frissel, G. M. Crankovic, A. W. Ronke, D. M. Jenkins, K. L. O’Keefe, R. L. Stedfeld, K. M. Mills, L. A. Abel, R. T. Kieपुरa, P. Thomas, e N. D. Wheaton, Eds. ASM International, 1998, pp. 743–770.
- [68] ASM International, «Solidification of Eutetic Alloys - Aluminum Silicon Alloys», em *ASM Handbook Volume 15: Casting*, 9.^a ed., D. M. Stefanescu, J. R. Davis, J. D. Destefani, T. B. Zorc, H. J. Frissel, G. M. Crankovic, A. W. Ronke, D. M. Jenkins, K. L. O’Keefe, R. L. Stedfeld, K. M. Mills, L. A. Abel, R. T. Kieपुरa, P. Thomas, e N. D. Wheaton, Eds. ASM International, 1998, pp. 159–168.
- [69] G. K. Sigworth, «Fundamentals of solidification in aluminum castings», *Int. J. Met.*, vol. 8, n. 1, pp. 7–20, 2014.
- [70] ASM International, «Metallographic Techniques and Microstructures: Specific Metals and Alloys - Aluminum Alloys», em *Metallography and Microstructures Handbook*, 9.^a ed., K.

- Mills, J. R. Davis, J. D. Destefani, D. A. Dieterich, G. M. Crankovic, H. J. Frissell, D. M. Jenkins, W. H. Cubberly, R. I. Stedfeld, R. T. Kieपुरa, e B. R. Sanders, Eds. ASM International, 1985, pp. 351–388.
- [71] RAMADA AÇOS, «Aços Inoxidáveis e Refratários, R304», 2017. [Em linha]. Disponível em: http://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-inoxida-a1veis-e-refracta-a1rios/r-304_.html. [Acedido: 11-Jan-2018].
- [72] Aalco Metals, «Aluminium Alloy - Commercial Alloy - 6061 - T6 Extrusions», 2009. [Em linha]. Disponível em: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6061-T6-Extrusions_145.ashx. [Acedido: 10-Jan-2018].
- [73] Aalco Metals, «Aluminium Alloys - Aluminium 1050 Properties, Fabrication and Applications, Supplier Data by Aalco», 2005. [Em linha]. Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2798>. [Acedido: 10-Jan-2018].
- [74] Metalweb, «Aluminium Alloy 6061 - Composition, Properties, Temper and Applications of 6061 Aluminium», 2006. [Em linha]. Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3328>. [Acedido: 10-Jan-2018].
- [75] Spectro Analytical Labs, «Hardness Conversion Chart for Aluminium Products», 2017. [Em linha]. Disponível em: <http://www.spectro.in/Hardness-Conversion-Chart-for-Aluminium.html>. [Acedido: 10-Jan-2018].
- [76] ASM International, «Copper and Copper Alloys», em *ASM Handbook Volume 15: Casting*, 9.^a ed., D. M. Stefanescu, J. R. Davis, J. D. Destefani, T. B. Zorc, H. J. Frissell, G. M. Crankovic, A. W. Ronke, D. M. Jenkins, K. L. O’Keefe, R. L. Stedfeld, K. M. Mills, L. A. Abel, R. T. Kieपुरa, P. Thomas, e N. D. Wheaton, Eds. ASM International, 1998, pp. 771–785.
- [77] ASM International, «Metallographic Techniques and Microstructures: Specific Metals and Alloys - Copper and Copper Alloys», em *Metallography and Microstructures Handbook*, 9.^a ed., K. Mills, J. R. Davis, J. D. Destefani, D. A. Dieterich, G. M. Crankovic, H. J. Frissell, D. M. Jenkins, W. H. Cubberly, R. I. Stedfeld, R. T. Kieपुरa, e B. R. Sanders, Eds. ASM International, 1985, pp. 399–414.
- [78] Thomas Publishing, «Nickel-Chromium Corrosion Resistant Coatings», 2018. [Em linha]. Disponível em: <https://www.thomasnet.com/articles/chemicals/nickle-chromium-coating/>. [Acedido: 12-Jan-2018].
- [79] Design Studio FEUP, «APRESENTAÇÃO BICAFÉ - MÁQUINA DE 2 GRUPOS - CARRINHO DE TRANSPORTE», Porto, 2018.
- [80] Fluid-o-Tech, «Brass rotary vane pumps PO 70-400 series». Fluid-o-Tech, p. 2, 2017.
- [81] L. A.M.Pereira, «Motor para Máquina de Café a.», *A.M.Pereira, LDA*, 2018. [Em linha]. Disponível em: <https://www.ampereiralda.pt/produto/motor-maquina-cafe/>. [Acedido: 13-Fev-2018].
- [82] INEGI, «ASSEMBLY_MAQ_PROTOTIPO.PDF». Porto, p. 1, 2018.
- [83] BASF SE, «ecovio ® for injection-molding applications», p. 28, 2016.
- [84] PACE Technologies, «Metallographic Etchants», 2006. [Em linha]. Disponível em: <http://www.metallographic.com/Metallographic-Etchants/Metallography-Etchants.htm>. [Acedido: 22-Jan-2018].
- [85] Abaqus 6.12, «12.8 Adding a boundary layer to a tetrahedral mesh», *Dassault Systèmes*, 2012. [Em linha]. Disponível em: <http://media.3ds.com/support/simulia/public/v612/release-notes/books/rnb/default.htm?startat=abc12aqs08.html>. [Acedido: 31-Jan-2018].
- [86] AK Steel Corporation, «304/304L STAINLESS STEEL DATA SHEET», *AK Steel*, 2007. [Em linha]. Disponível em: http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/stainless/austenitic/304_304l_data_sheet.pdf. [Acedido: 15-Dez-2017].

- [87] Engineering ToolBox, «Water - Thermophysical Properties», 2017. [Em linha]. Disponível em: https://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d_162.html. [Acedido: 30-Jan-2018].
- [88] Engineering ToolBox, «Water - Dynamic and Kinematic Viscosity», 2017. [Em linha]. Disponível em: https://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html. [Acedido: 30-Jan-2018].
- [89] Abaqus 6.12, «4.1 Implicit advection in Abaqus/CFD», *Dassault Systèmes*, 2012. [Em linha]. Disponível em: <http://media.3ds.com/support/simulia/public/v612/release-notes/books/rnb/default.htm?startat=abc04aqs01.html>. [Acedido: 31-Jan-2018].
- [90] Abaqus 6.10, «6.6.2 Incompressible fluid dynamic analysis - Turbulence models - Spalart-Allmaras (SA) turbulence model», *Dassault Systèmes*, 2010. [Em linha]. Disponível em: <http://abaqusdoc.ucalgary.ca/books/usb/default.htm?startat=pt03ch06s06aus45.html>. [Acedido: 31-Jan-2018].
- [91] Engineers Edge, «Convective Heat Transfer Coefficients Table Chart | Engineers Edge | www.engineersedge.com», 2018. [Em linha]. Disponível em: https://www.engineersedge.com/heat_transfer/convective_heat_transfer_coefficients_13378.htm. [Acedido: 03-Fev-2018].

ANEXO A. Planeamento das atividades experimentais

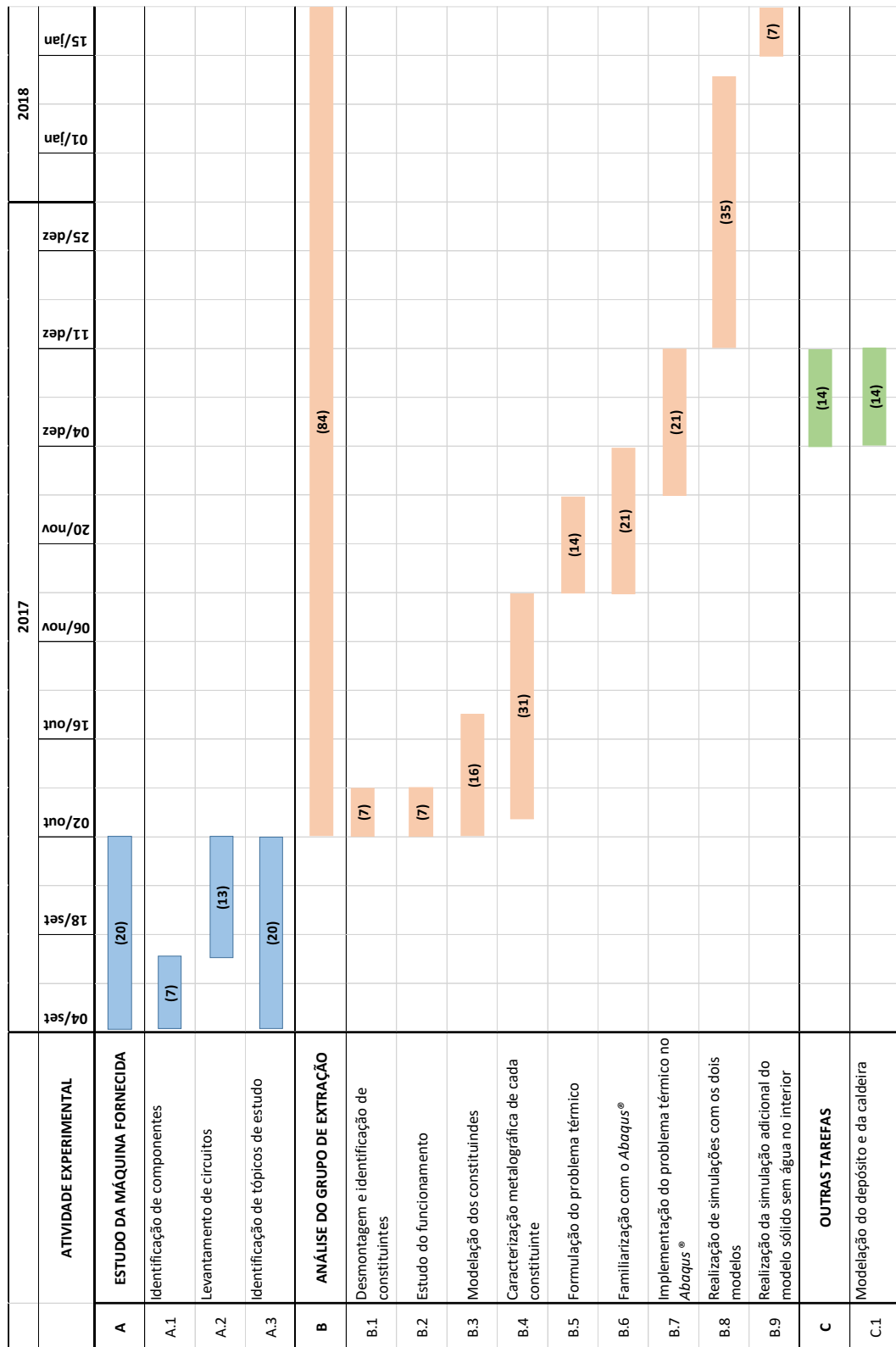


Figura 120 Planeamento das principais atividades experimentais realizadas. Os números entre parênteses correspondem ao número de dias atribuídos a cada tarefa.

ANEXO B. Placa eletrónica da máquina

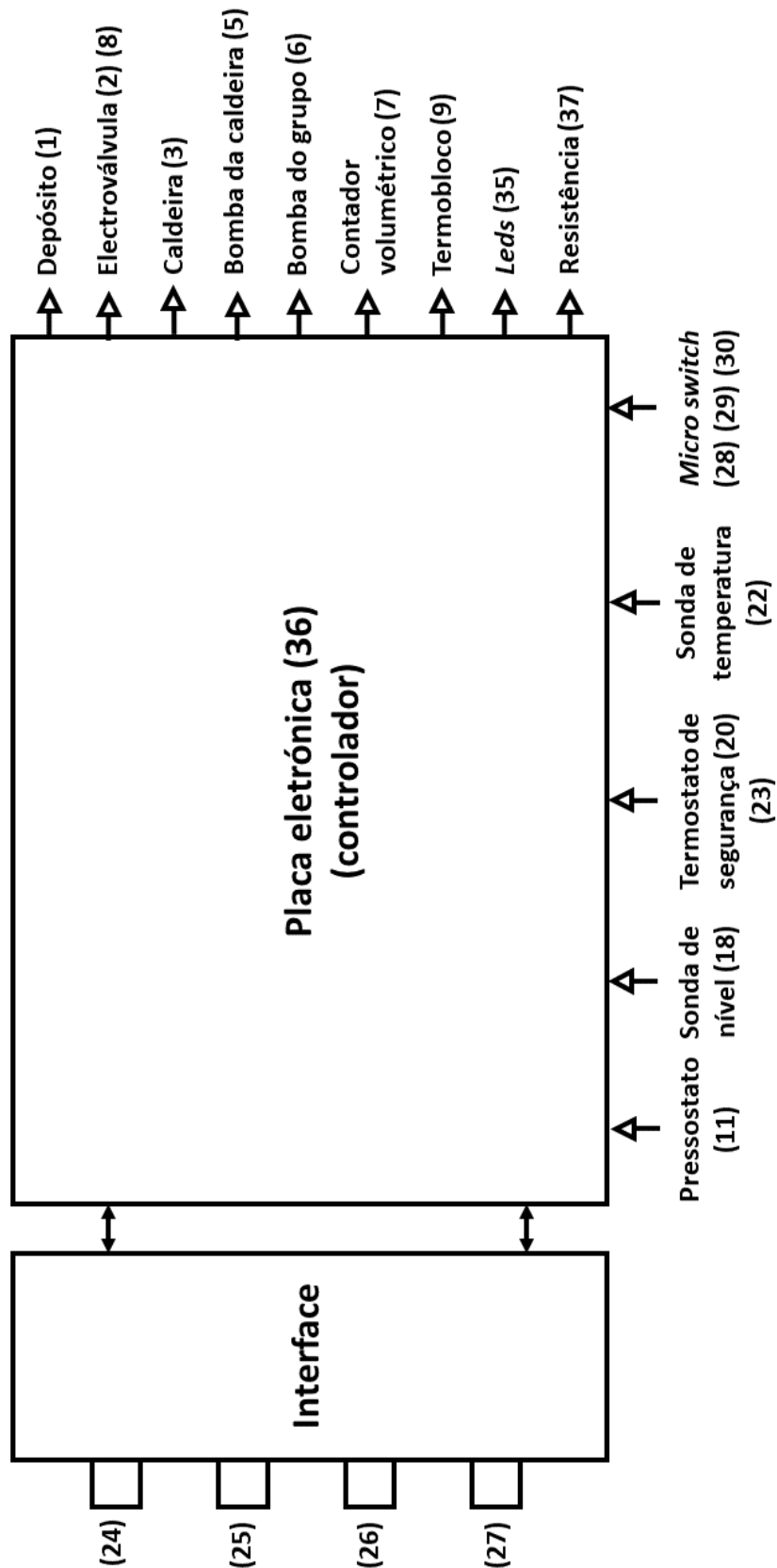


Figura 121 Indicação dos *inputs* e *outputs* da placa eletrónica da máquina em estudo no capítulo 3.

ANEXO C. Classificação dos parafusos do grupo

Em seguida segue-se a classificação, de acordo com a norma ISO, dos parafusos mencionados na secção 4.2, aquando da desmontagem do grupo de extração. Esta classificação é efetuada com recurso às normas do livro de Desenho Técnico Básico [63] e o objetivo é permitir uma melhor identificação dos mesmos.

C1. Parafusos que fixam o grupo à placa e a placa à máquina

Consultando o livro de Desenho Técnico Básico [63], é possível classificar estes parafusos, de acordo com a norma ISO, verificando-se que se tratam de parafusos de cabeça cilíndrica boleada larga com oco cruciforme (CBL), ISO 7045, completamente roscados. De acordo com esta norma, o material recomendado é da categoria 4.8 (aço ao carbono médio, $C < 0,55\%$), com oco cruciforme do tipo H (Philips). Nas Figura 122 a) e b) estão representados, respetivamente, um dos parafusos que fixa a base de suporte do grupo à placa e um dos parafusos que fixa esta placa ao corpo da máquina, com a respetiva designação, de acordo com a norma.

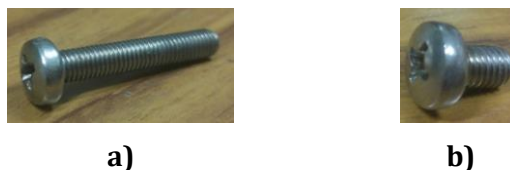


Figura 122 Parafusos CBL, ISO 7045; a) Parafuso ISO 7045 - M5 x 30 - 4.8 - H, que faz a fixação entre a base metálica de suporte do grupo e a placa de suporte em plástico; b) Parafuso ISO 7045 - M5 x 8 - 4.8 - H, que faz a fixação entre a placa em plástico e o corpo da máquina.

C2. Parafusos que fixam o termobloco à base

Consultando, uma vez mais, a norma ISO em [63], verifica-se que se tratam de parafusos de cabeça cilíndrica de oco hexagonal (CHC), ISO 4762. Neste tipo de parafusos, e atendendo à norma, a classe do material só pode ser uma das três correspondentes a aços ligados, com tratamento térmico (têmpera mais revenido), ou seja, classes 8.8, 10.9 ou 12.9. Neste caso em particular, sabe-se, apenas, que se trata de um parafuso CHC, M5, com 50mm de comprimento. O catálogo [64], confirma a norma adotada para o parafuso. Na Figura 123 encontra-se um dos parafusos que garante a fixação do termobloco à base de suporte, com a respetiva designação, de acordo com a norma.



Figura 123 Parafuso CHC ISO 4762 - M5 x 50, que garante a fixação do termobloco à base metálica de suporte do grupo.

ANEXO D. Tabelas dos reagentes

D1. Reagentes de ligas de alumínio

Na Tabela 21 encontra-se alguma informação adicional em relação aos reagentes utilizados no ataque químico das amostras dos componentes em ligas de alumínio.

Tabela 21 Informação relativa aos reagentes utilizados nas amostras em ligas de alumínio [68].

Reagente	Composição química	Modo de aplicação	Amostras
Keller's	2 ml de HF (48%), 3ml HCL (conc.), 5ml HNO ₃ (conc.), 190 ml H ₂ O	Imergir por 8-15s, lavar em corrente de água morna e secar.	Termoblocos (A, B, C1, C2); base metálica de suporte do grupo.
HF	1 ml HF (48%), 200ml H ₂ O	Esfregar por 15s ou imergir por 30-45s.	Êmbolo da cápsula.
Poulton's	12ml HCL (conc.), 15ml HNO ₃ (conc.), 1ml HF (48%), 1ml H ₂ O	Não é especificado. Utilizou-se o mesmo que o HF.	Êmbolo da cápsula; aro de suporte da mola.

Nas Figura 124 a) a c) observa-se cada um dos reagentes utilizados nas ligas de alumínio.

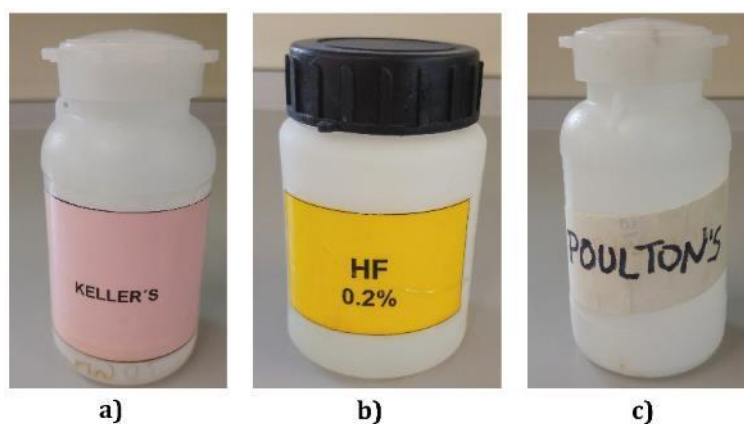


Figura 124 Reagentes utilizados nas ligas de alumínio; a) Keller's; b) HF (0.2%); c) Poulton's.

D2. Reagente das ligas de cobre

Na Tabela 22 encontra-se alguma informação adicional relativa ao reagente utilizado no ataque químico das amostras dos componentes em latão.

Tabela 22 Informação relativa aos reagentes utilizados nas amostras em ligas de cobre [77].

Reagente	Composição química	Modo de aplicação	Amostras
(sem nome)	2g K ₂ Cr ₂ O ₇ , 4ml de solução saturada de NaCl, 8ml de H ₂ SO ₄ , 100ml de H ₂ O	Não é especificado. Imergiu-se durante 15s, lavou-se em água morna e secou-se.	Placa permutadora de calor; peça roscada grande; peça roscada pequena

Na Figura 125 observa-se o reagente utilizado nas amostras de latão.



Figura 125 Reagente utilizado nas peças em latão.

D3. Reagente do aço de mola

Na Tabela 23 encontra-se alguma informação adicional relativa ao reagente utilizado no ataque químico à amostra da mola do êmbolo.

Tabela 23 Informação relativa aos reagentes utilizados na amostra em aço [84].

Reagente	Composição química	Modo de aplicação	Amostras
Villela's	1g de ácido pírico (cristalizado), 5ml de ácido clorídrico, 100ml de etanol.	Imergir por 20s a alguns min, lavar em água morna e secar.	Mola do êmbolo.

Na Figura 126 observa-se o reagente *Villela's* utilizado.



Figura 126 Reagente *Villela's* utilizado na amostra da mola do êmbolo.

ANEXO E. Metodologia de implementação do problema térmico no *Abaqus*®

Em seguida são apresentados todos os passos realizados no *Abaqus*® [5], para a concretização da simulação. Estes incluem:

- Criação dos modelos FEA (*Finite Element Analysis* – Análise por elementos finitos) (secção E1)
- Geração de malhas e criação de uma interface comum (superfície de malha) (secção E2)
- Criação e atribuição de materiais (secção E3)
- *Assembly* (secção E4)
- Criação de *steps* (secção E5)
- Condições fronteira e condições iniciais (secção E6)

De salientar que as informações que são expostas nos tópicos que se seguem são o resultado da realização de várias simulações, correspondendo à versão final implementada. Estas foram realizadas com o objetivo de identificar erros que impossibilitassem o decorrer da simulação, encurtar o tempo de simulação (que chega a ser de vários dias) ou, simplesmente, aperfeiçoar a análise, aproximando-a de uma situação mais realista. Assim, tratou-se de um processo um pouco iterativo e, também, demorado, mas que ainda poderá ser bastante aperfeiçoado, em futuros desenvolvimentos.

Todas as unidades consideradas são as do Sistema Internacional (SI) (Tabela 24). Todas as restantes unidades necessárias derivam das apresentadas.

Tabela 24 Unidades consistentes consideradas na simulação.

Massa	Comprimento	Tempo	Temperatura	Força	Energia
kg	m	s	K	N	J

E1. Criação dos modelos FEA

Uma vez que se pretende analisar a distribuição temporal e espacial do aquecimento no termobloco e na água, foi necessário criar dois modelos FEA distintos (comando *Model* no *Abaqus*®).

O primeiro modelo, designado por *heat*, é um modelo sólido, do tipo *heat-transfer* (transferência de calor), que contempla o termobloco, o tubo da resistência e o tubo da água vazio (Figura 127). O segundo modelo (Figura 128), designado por *flow*, é um modelo fluídico, do tipo CFD (*Computational Fluid Dynamics* – Dinâmica dos fluídos computacional). Este corresponde, apenas, à massa de água que se pretende que circule no interior dos canais da água existentes no modelo sólido. Na Figura 129 observam-se os dois modelos FEA juntos.

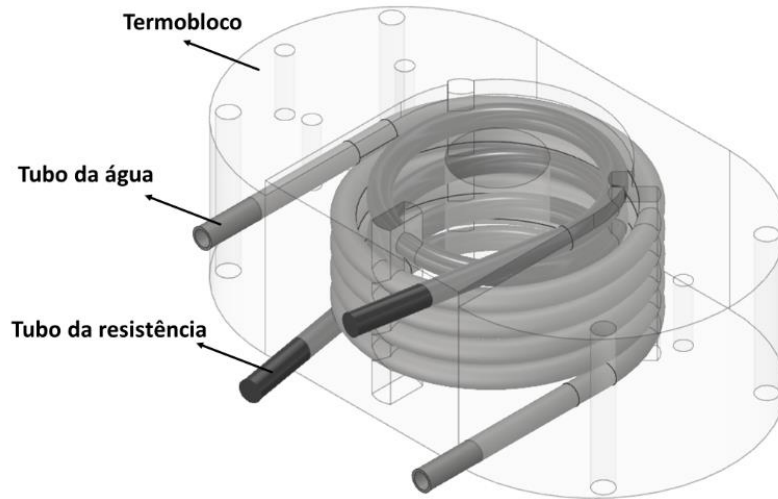


Figura 127 Modelo *heat-transfer*, ao qual se atribui a designação *heat* [77].

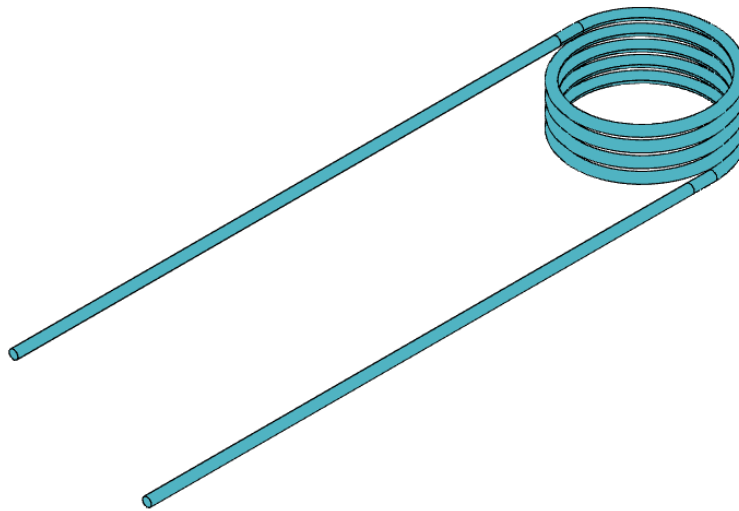


Figura 128 Modelo CFD, ao qual se atribui a designação de *flow* [5].

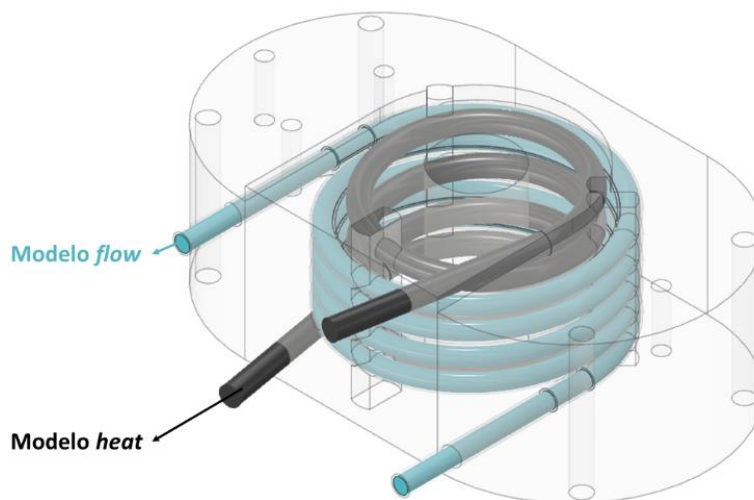


Figura 129 Modelo *heat* (termobloco e tubos de água e da resistência) e modelo *flow* (massa de água a azul) juntos [5].

Note-se que as extremidades do modelo fluídico (Figura 128) estão mais alongadas, existindo uma parte do modelo (parte útil) que fica no interior do tubo da água (Figura 129) e uma zona, correspondente às extensões, que se prolonga para o exterior do tubo. Estas foram criadas propositadamente, somente, para facilitar algumas questões relacionadas com a simulação e não contribuem para a análise. Estas questões são abordadas em maior detalhe na secção E6, mas, de um modo geral, a sua criação visa assegurar que o escoamento entra no interior do tubo (zona útil para a simulação) num perfil mais estabilizado e definido.

E2. Geração de malhas e criação de uma interface comum (superfície de malha)

Com a existência de dois modelos distintos é necessário criar uma relação entre ambos. Esta relação é conseguida no módulo de interação (*Module Interaction*) no qual se define uma fronteira de co-simulação (*co-simulation boundary*), que possibilita a existência de uma interface comum entre o modelo sólido e o fluídico. A interface comum entre modelos corresponde à indicada a amarelo na Figura 130 a) e corresponde à superfície interna dos tubos da água, pertencentes ao modelo sólido e à superfície externa do modelo fluídico. Na Figura 130 b) observa-se o modelo fluídico dentro do tubo da água do modelo sólido.

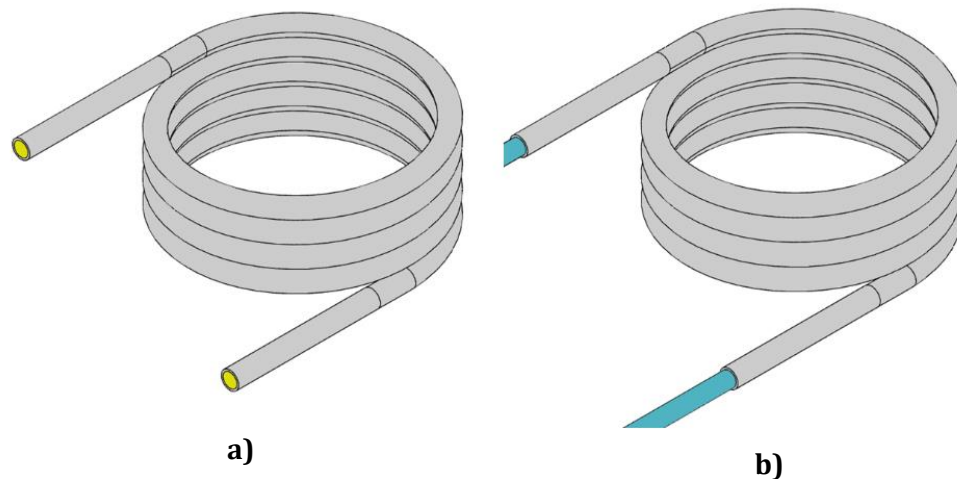


Figura 130 Indicação da interface comum entre modelos [5]; a) tubo da água, pertencente ao modelo sólido, cuja superfície interior coincide com a interface comum representada a amarelo; b) modelo fluídico no interior dos tubos da água do modelo sólido, para demonstrar que a sua superfície exterior corresponde à superfície interior do tubo de água.

A criação desta interação só é possível pela criação de uma malha comum. As malhas são geradas no módulo da malha (*Module Mesh*) e a sua informação está associada ao modelo em que são criadas. Assim, para garantir que a malha é igual nos dois modelos, começou-se por gerar uma malha no modelo completo (sólido e fluídico juntos) e, em seguida, separaram-se os modelos, fixaram-se as suas respetivas malhas e criou-se a interação.

Existem vários tipos de elementos que se podem utilizar nas malhas e a opção por um, ou outro tipo, resulta de uma combinação de fatores, como a complexidade da geometria, a qualidade dos resultados e o esforço computacional, normalmente associado ao número de nós desse tipo, o que se traduz em maiores ou menores tempos de simulação. Geralmente, são preferidos elementos que permitam a obtenção de malhas mais estruturadas, para que se possa obter uma

maior coerência na análise de resultados. No que respeita ao tamanho dos elementos sabe-se que, por norma, a um maior número de elementos de malha e, por isso, de tamanhos menores, correspondem resultados mais precisos. No entanto, o ideal seria a realização de uma análise de sensibilidades para avaliar o melhor compromisso entre o tamanho dos elementos, a precisão dos resultados e o esforço computacional, já que quanto maior for o número de elementos, maior é o tempo da simulação. No módulo *mesh* em *element type*, escolhem-se o tipo de elementos e em *seed* escolhem-se o tamanho dos elementos.

Tendo em consideração a geometria do modelo sólido, optou-se pela utilização de elementos tetraédricos (*tetrahedral elements*) de quatro nós, os quais permitem a obtenção de geometrias mais complexas, com maior precisão, para além de serem mais fáceis de trabalhar computacionalmente. O tamanho global escolhido para os elementos (*global seeds*) é de 3mm. No entanto, em determinados locais específicos que possuam geometrias mais complexas, o tamanho local do elemento (*local seed*) é de 1mm. Estes locais são o tubo da água e todas as zonas curvas que rodeiam furos ou cavidades do termobloco, onde a existência de elementos menores é mais conveniente para se obter uma malha mais estruturada. Para combater a diferença de tamanhos em zonas de transição, o *Abaqus*® [5] possui um algoritmo que faz o crescimento gradual dos elementos, adjacentes aos que têm 1mm de tamanho, até aos que têm 3mm, como se verifica na Figura 131 b). Também foi introduzido um controlo de curvatura, para que o programa faça o melhor ajuste possível na geometria dos elementos da malha, evitando a deformação excessiva dos mesmos, nas zonas muito curvas, como é o caso dos tubos no interior do termobloco.

Na Figura 131 a) observa-se a malha tetraédrica do modelo sólido com as dimensões global de 3mm e local de 1mm, com destaque para a zona da entrada do tubo de água. Na Figura 131 b) observa-se a entrada do tubo de água ampliada, sendo possível verificar o aumento gradual do tamanho dos elementos realizado pelo algoritmo, desde o tubo até às zonas centrais do termobloco.

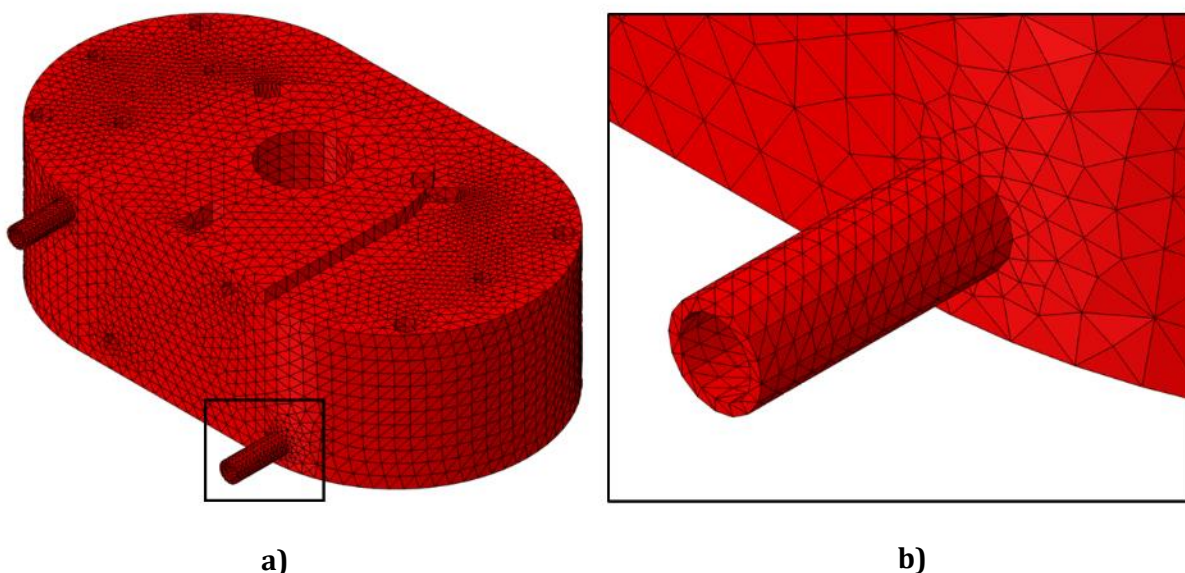


Figura 131 Malha do modelo sólido [5]; a) malha tetraédrica no modelo sólido, sendo possível observar os tamanhos mais reduzidos dos elementos, juntos às zonas curvas. Destaque para uma porção do tubo da água; b) ampliação da entrada do tubo da água, destacado em a). Observa-se que o tubo tem elementos de tamanhos mais reduzidos enquanto o termobloco tem elementos maiores. Também se observa o aumento gradual do elemento de malha no termobloco, a partir do bordo do tubo, gerado pelo *Abaqus*® [5].

No modelo fluídico, utiliza-se um tamanho de 1mm, tal como nos tubos da água do modelo sólido, todavia, a variedade de tipos de elementos utilizada é maior, devido à necessidade de criar a camada limite (*boudary layer*) que define o perfil de velocidades do escoamento.

Considerando, primeiro, o modelo fluídico, sem as extensões adicionais criadas nas suas extremidades (Figura 132 a), tem-se, no interior da massa de fluído, uma malha constituída por elementos tetraédricos. Já a camada limite é constituída por três camadas de elementos do tipo prisma triangular, ou cunha, (*wedge elements*) de seis nós, extrudidos radialmente a partir das faces triangulares dos elementos tetraédricos, até ao exterior da massa de fluído, tal como se verifica na Figura 132 b). Uma vez que a velocidade do escoamento na interface entre o exterior da massa de fluído e o interior do tubo de água é nula, sendo, também, aqui, que os efeitos da camada limite são maiores, tem-se que, a primeira camada junto à parede do tubo é a mais fina, sendo que a espessura de cada camada aumenta à medida que se aproxima da zona interior.

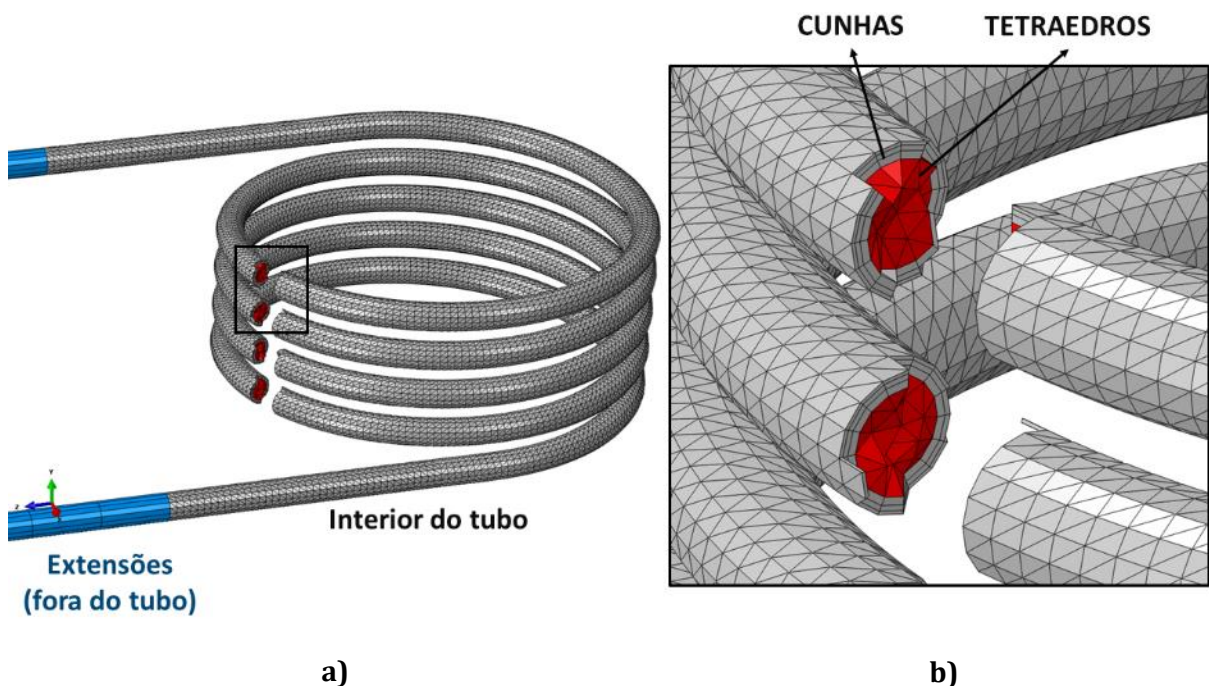


Figura 132 Identificação do tipo de elementos da malha do modelo fluído, sem considerar as extensões [5]; a) malha no modelo fluídico, com destaque para uma zona em corte, na parte do modelo que se encontra no interior do tubo; b) interior da massa de fluído, sendo visíveis os elementos tetraédricos no interior do fluído e as camadas de elementos em cunha que constituem a camada limite. Note-se que a espessura das camadas aumenta à medida que se aproxima do interior.

Nas extensões criadas, o princípio é o mesmo, todavia, como estas resultam de uma extrusão longitudinal das extremidades do modelo, então, também os seus elementos são o resultado da extrusão longitudinal das faces dos elementos existentes nessa extremidade. Assim, da extrusão da face triangular dos tetraedros, no interior, resulta um prisma triangular e da extrusão da face retangular dos prismas triangulares, da camada, resultam paralelepípedos (*brick elements*) de oito nós. Desta forma, as extensões possuem um interior com uma malha em cunhas, sendo que a camada limite é constituída por camadas de elementos paralelepipedicos. Na Figura 133 é destacada uma zona de transição entre a extremidade do modelo do fluido que fica no interior do tubo e a extensão criada, sendo possível observar os tipos de elementos utilizados no interior da massa de fluído e na camada limite.

O *Abaqus®* [5] possui uma caixa de diálogo denominada *Boundary Layer* (Camada Limite), no módulo *mesh*, junto do comando *mesh controls*, que permite introduzir um conjunto de dados para definir a cada limite. Estes dados são a espessura da camada junto à parede do tubo (*wall element height*), na qual se introduziu o valor 0.001mm, o fator de crescimento (*growth factor*), na qual se introduziu o valor 1.5, e o número de camadas (*number of layers*), na qual se introduziu o valor de 3. Os valores introduzidos foram os mesmos para todo o modelo fluídico. A partir destes dados, o *Abaqus®* [5] determina a espessura total da camada limite a criar. Informações adicionais sobre a implementação de uma camada limite em malhas tetraédricas no *Abaqus®* [5], pode ser encontrada no manual digital do *Abaqus®*, na secção *Abaqus Release Notes*, em [85].

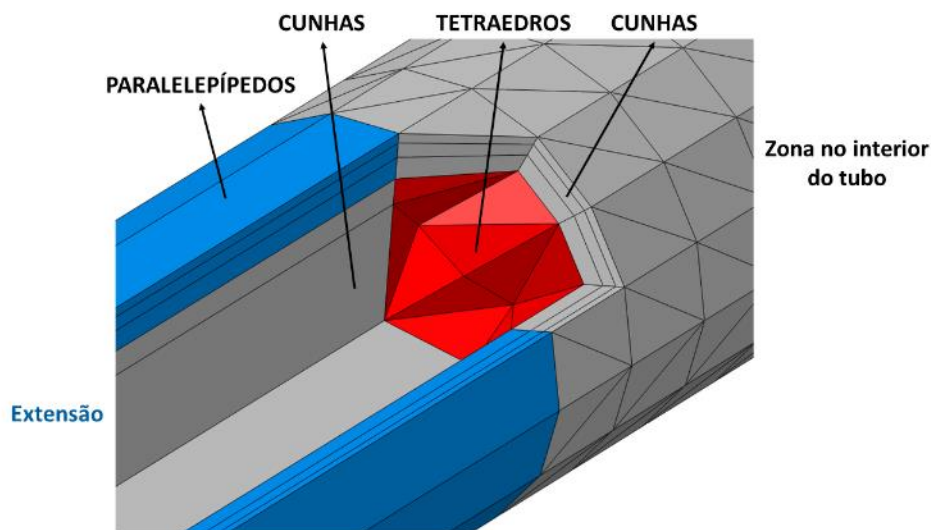


Figura 133 Zona de transição entre a zona do modelo que fica no interior do tubo e a extensão criada, sendo possível observar que os elementos utilizados nas extensões resultam da extrusão das faces dos elementos existentes na zona do modelo que fica no interior do tubo [5].

E3. Criação e atribuição de materiais

Em cada modelo, a criação e atribuição de materiais é efetuada no módulo propriedade (*Module Property*). Começa-se por criar os materiais necessários, introduzindo-se a suas principais propriedades e, por fim, criam-se as secções (*sections*) para a atribuição correta dos mesmos aos locais adequados.

No modelo sólido, criou-se uma *section* para o termobloco e outra para os tubos da água para se fazerem corresponder os respetivos materiais, cujas propriedades se encontram na Tabela 25. Note-se os valores introduzidos para o termobloco correspondem aos indicados na Tabela 20 (secção 4.4.1.1), para a liga A336 identificada no mesmo, sendo que o valor da massa específica é o real determinado experimentalmente, para que os resultados sejam os mais realistas possíveis. Já os valores introduzidos para o tubo da água não são exatamente iguais aos referidos na Tabela 19 (secção 4.4.1.1), para o aço inoxidável identificado (AISI 304), pois a identificação precisa do aço ocorreu numa fase posterior à da introdução dos dados dos materiais. Mesmo assim, não diferem significativamente.

Tabela 25 Valores introduzidos para as propriedades do material do termobloco e do aço inoxidável do tubo da água [67] e [86].

	Massa específica [kg/m³]	Condutividade térmica [W/m·K]	Calor específico [J/kg·K]
Termobloco (Liga A336)	2460	117	970
Tubo da água	7800	16.2 ⁸	500

No modelo fluídico introduziram-se, apenas, os valores das propriedades da água indicados na Tabela 26.

Tabela 26 Propriedades da água [87].

	Massa específica [kg/m³]	Condutividade térmica [W/m·K]	Calor específico [J/kg·K]
Água	1000	0.6 ⁹	4182

A viscosidade dinâmica da água foi introduzida de modo a depender da temperatura, tal como indicado na Tabela 27.

Tabela 27 Valores da viscosidade dinâmica introduzidos, em função da temperatura [88].

Temperatura [K]	Viscosidade dinâmica [Pa·s]
293.15	0.0010016
298.15	0.00089
303.15	0.0007972
313.15	0.0006527
323.15	0.0005465
333.15	0.000466
343.15	0.0004035
353.15	0.000354
363.15	0.0003142
373.15	0.0002816

⁸ Condutividade térmica fornecida à temperatura de 100 °C [86].

⁹ Condutividade térmica fornecida à temperatura de 25 °C [87].

E4. *Assembly*

O *assembly (Module Assembly)* não se aplica, pois, neste caso, os modelos estão “naturalmente” separados, existindo um modelo sólido, constituído pelo termobloco e pelo tubo da água, e um modelo fluídico que contém, somente, a água. No modelo sólido, o tubo da água e o termobloco são solidários, isto é, estão juntos, pelo facto de, no processo de fabrico do termobloco, a liga ser vazada com o tubo dentro do molde.

E5. *Module step*

No módulo *step (Module Step)* é possível definir com maior exatidão o tipo de análise que se pretende realizar, pela criação de um *step* em cada modelo e, também, especificar a combinação de resultados (*outputs*) desejável.

Quando se cria um *step*, surgem um conjunto de separadores que depende do tipo do modelo em causa. No modelo sólido (transferências de calor), surgem os separadores “*Basic*” (“Básico”), “*Incrementation*” (“Incrementação”) e “*Other*” (“Outro”). No modelo fluídico (CFD), surgem os separadores “*Basic*” (“Básico”), “*Incrementation*” (“Incrementação”), “*Solvers*” (“Solucionadores”) e “*Turbulence*” (“Turbulência”). De um modo geral, o *step* do modelo sólido (transferência de calor) é bastante mais simples de definir do que o do modelo CFD, pois, neste último, é necessário escolher o modelo de turbulência mais adequado e introduzir os parâmetros de integração nos incrementos.

Em ambos os modelos, definiu-se, no separador “*Basic*”, uma análise com a duração de 100s e em regime transiente, pois há interesse, não só, no estudo da variação espacial das temperaturas, mas, também, da variação temporal. No caso do modelo CFD é neste separador que se escolhe, também, a opção de equação de energia com consideração da temperatura.

Assim, sobram, no modelo sólido, os separadores “*Incrementation*” e “*Other*”. No primeiro não se colocaram registações no número e no tamanho dos incrementos, tendo-se definido que a máxima variação de temperatura por incremento é de 2K. No segundo, não se alteraram as definições padrão do *software* relativas ao tipo de equações e soluções a utilizar.

No modelo CFD sobram os separadores “*Incrementation*”, “*Solvers*” (“Solucionadores”) e “*Turbulence*”.

No separador “*Incrementation*” existem um conjunto de parâmetros que surgem preenchidos com determinados valores padrão definidos pelo programa. Destes, diminuiu-se o tempo do incremento inicial de 0.01 para 0.001, para se dar maior estabilidade aos instantes iniciais da simulação e aumentaram-se o número máximo de CFL (Courant-Friedrichs-Lewy), de 0.45 para 3 e o fator de escala de crescimento do tempo do *step* de 0.025 para 0.05, para que a simulação decorra mais rapidamente. Os restantes parâmetros mantiveram-se inalterados. Para mais informações acerca do CFL recomendam-se [89]. Ainda no separador “*Incrementation*”, optou-se por seleccionar o método de integração de *Backward-Euler*, muitas vezes referido como o método implícito da equação de *Euler*. Trata-se de um método de resolução de equações diferenciais ordinárias que permite obter resultados com boas aproximações da equação original de *Euler*, reduzindo bastante ao tempo da simulação.

No separador “*Solvers*” utilizaram-se os valores padrão e no separador “*Turbulence*”, definiu-se o modelo de turbulência a utilizar, tendo-se optado pelo *Spalart-Allmaras*. A ativação de um modelo de turbulência é necessária para definir a forma como o programa deve lidar com

eventuais problemas de turbulência que surjam nas curvas, facilitando a sua convergência para uma solução.

A simulação numérica da turbulência é um processo complexo, existindo vários modelos com equações que usam a viscosidade de *eddy* (*eddy viscosity*) - $\tilde{\nu}$. A viscosidade de *eddy* relaciona a tensão de corte média de um fluido turbulento com o gradiente de velocidade. De acordo com [90], o modelo de *Spalart-Allmaras* é um modelo de turbulência que consiste numa única equação de transporte para a viscosidade de *eddy* e é capaz de produzir previsões, razoavelmente precisas, de fluxos turbulentos na presença de gradientes de pressão adversos. É um modelo menos complexo, em comparação com outros que existem, mas que se considera suficiente para esta aplicação. Dada a extensão dos conceitos envolvidos no modelo, que ultrapassam a abordagem da presente dissertação, refere-se [90] como uma fonte de informação adicional acerca deste tema. Os valores utilizados para as variáveis da equação são os pré-definidos pelo *Abaqus*® [5].

Uma vez criados os *steps* de cada modelo, definiram-se, ainda no módulo *step*, alguns *outputs*. No modelo sólido definiram-se a temperatura (em cada nó) e o fluxo de calor (na face do elemento), com um *output* por segundo. No modelo fluídico definiram-se a temperatura (em cada nó), a velocidade e a turbulência, com um *output* por segundo. No histórico final definiu-se o fluxo de massa, com dez *outputs* por segundo.

E6. Condições fronteira e condições iniciais

Antes da implementação das condições fronteira e das condições iniciais é necessário compreender os diversos fenómenos térmicos envolvidos.

Começando-se pelo modelo sólido, tem-se que o termobloco, um bloco em liga de alumínio, cujas propriedades se encontram na Tabela 25, possui, no seu interior, os canais de água em aço inoxidável (Tabela 25) e uma resistência elétrica que o aquece, por condução de calor.

A resistência possui um valor teórico para a potência de 1000W e um valor calculado de 1017W, tal como indicado na Tabela 18 (secção 4.4.1.1). Embora o valor de 1017W seja o mais realista, optou-se por utilizar o valor de 1000W, pois, apesar de a diferença não ser muito significativa, é o caso mais restritivo. A distribuição do valor da potência pela área superficial útil da resistência (área de contacto entre a resistência e o termobloco), resulta no fluxo de calor real (q), responsável por aquecer o bloco por condução. Na Figura 134 a) sumarizam-se estas informações. Note-se que a área do bloco que está em contacto com a resistência ($A_{b,r}$) é ligeiramente inferior à área superficial da resistência que se encontra no interior do bloco ($A_{\text{útil da resistência}}$), devido às três pequenas cavidades que existem no topo do termobloco, em que parte da resistência fica em contacto direto com o ambiente.

Para além da fonte de calor que é o fluxo de calor proveniente da resistência, também é necessário considerar as perdas de calor existentes. Na realidade, estas podem ocorrer por convecção, radiação e até por condução com outros componentes adjacentes que estejam a temperaturas inferiores. Nesta simulação, consideraram-se, apenas, os efeitos de perda de calor do termobloco por convecção natural com o meio ambiente. Para isso foi necessário definir um valor para a temperatura ambiente (T_{∞}) e um valor para o coeficiente de transferência de calor por convecção natural (h_n). Para a definição destes valores teve-se em consideração a opinião de alguns professores da FEUP com experiência na área térmica e, também, os valores disponíveis em [91], optando-se por aqueles que correspondem aos casos mais críticos para a eficiência térmica do termobloco.

Assim, no que respeita à temperatura ambiente, considerando que é inverno em Portugal e que a máquina se encontra no interior de um estabelecimento, onde a temperatura ambiente é, à partida, superior à registada no exterior, utilizou-se o valor de 299.15K (26°C). Já para o coeficiente de convecção natural, verifica-se que os valores mais comuns variam de 5 a 10W/m²K, tendo-se optado pelo valor máximo (10W/m²K), para considerar um caso mais crítico. Note-se, todavia, que a perda de calor por convecção é função, não só, do coeficiente de convecção natural e da temperatura ambiente, mas, também, da área superficial do termobloco que está em contacto com o meio ambiente (A_s) e da temperatura dessa mesma superfície. Como o termobloco está a ser aquecido, a sua temperatura superficial varia com o tempo e não é igual por toda a área, o que leva a que a quantidade de calor perdida por convecção dependa da temperatura específica de um determinado local do termobloco, num certo instante tempo. O *Abaqus*® [5] faz este cálculo automaticamente. Na Figura 134 b) resumiram-se as informações relativas aos fenómenos de convecção.

A única condição inicial definida para o modelo sólido foi a temperatura inicial (T_i) de 299.15K, pois, antes de se iniciar o aquecimento do termobloco, está tudo à temperatura ambiente.

Na Figura 134 estão sumarizadas as condições fronteira e as condições iniciais referidas, com indicação dos valores necessários e com indicação do local de determinados fenómenos. De referir que as direções indicadas para o fluxo de calor (q), na Figura 134 a), e para a convecção, na Figura 134 b), são meramente ilustrativas e que, na realidade, ocorrem em várias direções.

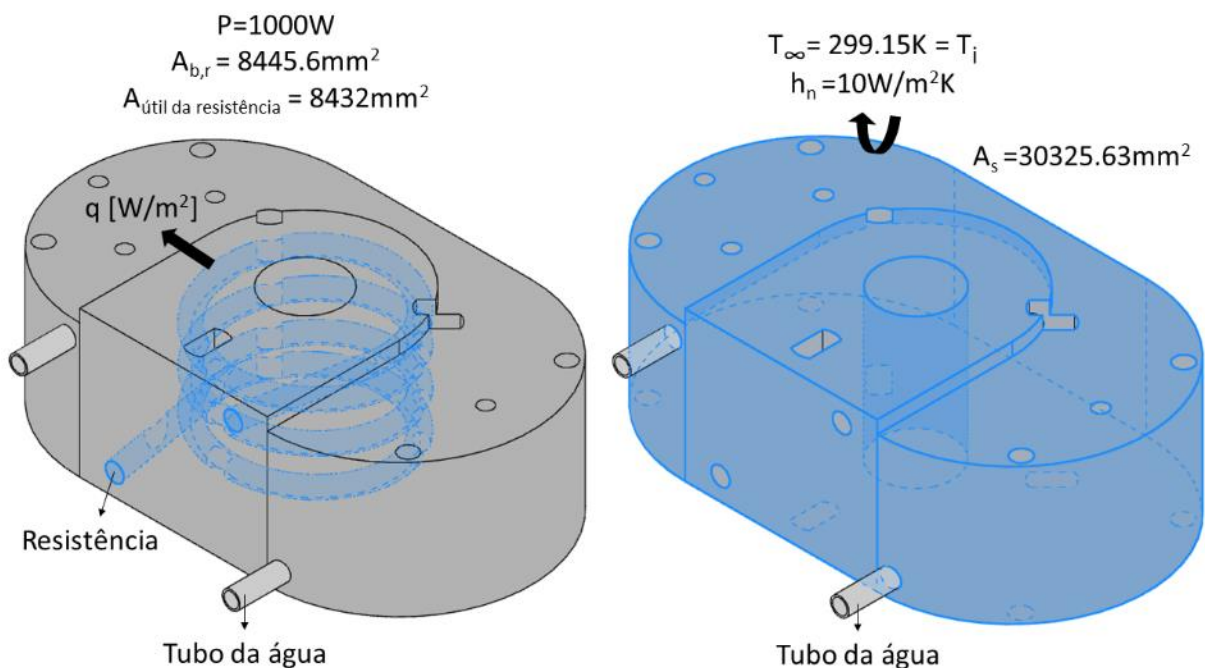


Figura 134 Condições de fronteira e condições iniciais no modelo sólido (*heat*); a) indicação do fluxo de calor (q) e dos valores da potência da resistência (P) e da sua área superficial, útil ao aquecimento ($A_{\text{útil da resistência}}$) (área da resistência no interior do bloco, representada a azul) e da área do bloco que está em contacto com a resistência ($A_{b,r}$); b) indicação da área superficial do bloco, em contacto com o ambiente, considerada nos fenómenos de transferências de calor por convecção (A_s) (indicada a azul), juntamente com o seu respetivo valor e com os valores do coeficiente natural de convecção (h_n) e da temperatura ambiental e inicial ($T_\infty = T_i$).

Para implementar a condição do fluxo no *Abaqus®* [5], cria-se, no módulo carga (*Module Load*), uma condição em *Load*, na qual se escolhe o tipo *surface heat flux* (fluxo de calor na superfície), se introduz o valor da potência (1000W) e se seleciona modo de atuação (amplitude instantânea). Com estes dados, o programa determina a área superficial total da resistência e calcula o fluxo de calor da mesma, sendo que o modo instantâneo indica que o fluxo de calor tem início no instante em que se ativar a resistência. É importante referir que a potência é distribuída ponderadamente pela superfície da resistência, ou seja, tem em consideração a área de cada elemento de malha à superfície.

Já a condição da convecção funciona, no *Abaqus®* [5], como uma interação. No módulo *Interaction*, cria-se uma propriedade de interação (*Interaction Property*) do tipo *film condition* (condição do filme) na qual se introduz o valor de h_n . Posteriormente, cria-se uma interação do tipo *surface film condition* (condição do filme na superfície), seleciona-se a propriedade de interação criada e introduz-se a temperatura ambiente definida.

Em relação ao modelo fluídico, sabe-se que é constituído pela massa de água, cujas propriedades se encontram nas Tabela 26 e Tabela 27. Em seguida são expostas as condições fronteira desse modelo, sendo que são todas criadas no comando *BC* do módulo *Load*, do *Abaqus®* [5].

Começando-se pela extremidade da massa da água que corresponde ao lado onde a água entra no tubo e acompanhando a Figura 135, onde estão sumarizadas as condições fronteira implementadas, tem-se que a temperatura ambiente é de 299.15K, pelo que a massa de água entra no tubo da água à temperatura ($T_{e, \text{água}}$) de 299.15K. Para além da temperatura existe, ainda, o valor padrão da viscosidade cinemática de *eddy* ($5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), para as questões relacionadas com a turbulência.

Sabe-se, também, que a bomba só bombeia a água em direção à entrada do tubo, quando o termobloco atinge os 100°C. Como é referido e analisado na secção 4.4.3, fez-se, primeiro, a simulação prévia e isolada do aquecimento do termobloco sem considerar a circulação da água no seu interior, o que permite concluir que os 100°C são atingidos, na sonda de temperatura (22), aproximadamente, aos 60s. Assim, existe uma condição fronteira adicional na entrada, que se refere à variação da pressão, com o tempo, existindo um pico de pressão após os 60s, que se deve à entrada de água repentina no tubo. A partir deste momento, o fluxo passa a ser diferente de zero.

Na criação desta condição fronteira no *Abaqus®*, achou-se conveniente criar um *smooth step* em "*Amplitude*", para evitar a variação repentina de pressão no fluído à entrada, o que poderia gerar alguns problemas de turbulência que dificultavam o progresso da simulação. Assim, a pressão evolui de modo mais suave, durante 2 segundos, até atingir os 500Pa. Note-se que o valor de 500Pa não é realista, sendo apenas uma representação da pressão relativa necessária definir um caudal de $2\text{cm}^3/\text{s}$ ¹⁰. A pressão à entrada começa em 1Pa, somente, para evitar a ocorrência de erros no programa.

Na saída, a pressão é nula e é introduzido o valor padrão da viscosidade cinemática de *eddy* ($5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). A temperatura inicial de saída ($T_{s, \text{água inicial}}$) é igual à temperatura ambiente 299.15K, sendo que, posteriormente, com o decorrer da simulação, são registados os valores da temperatura da água aquecida.

¹⁰ O caudal de $2\text{cm}^3/\text{s}$ foi definido empiricamente, verificando-se que um café longo com cerca de 40ml (40cm^3), demora, aproximadamente, de 20s a ser tirado.

É importante referir que, quer na entrada, quer na saída, as condições fronteira são aplicadas nas extremidades das extensões. Estas são, apenas, auxiliares da simulação e são criadas, essencialmente, com dois propósitos:

- na entrada, evitar que a mudança de pressão gere turbulências que o programa não consegue resolver facilmente. Assim, espera-se que o perfil do escoamento já esteja mais estabilizado, quando entrar no tubo da água, pois já percorreu todo o comprimento da extensão até entrar na zona útil da simulação;
- na saída, permitir a medição correta da temperatura à saída do tubo da água, pela aplicação das condições fronteira numa zona mais afastada da que se pretende analisar.

As condições iniciais definidas para o modelo fluídico são a temperatura de 299.15K e a viscosidade cinemática de *eddy* ($5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

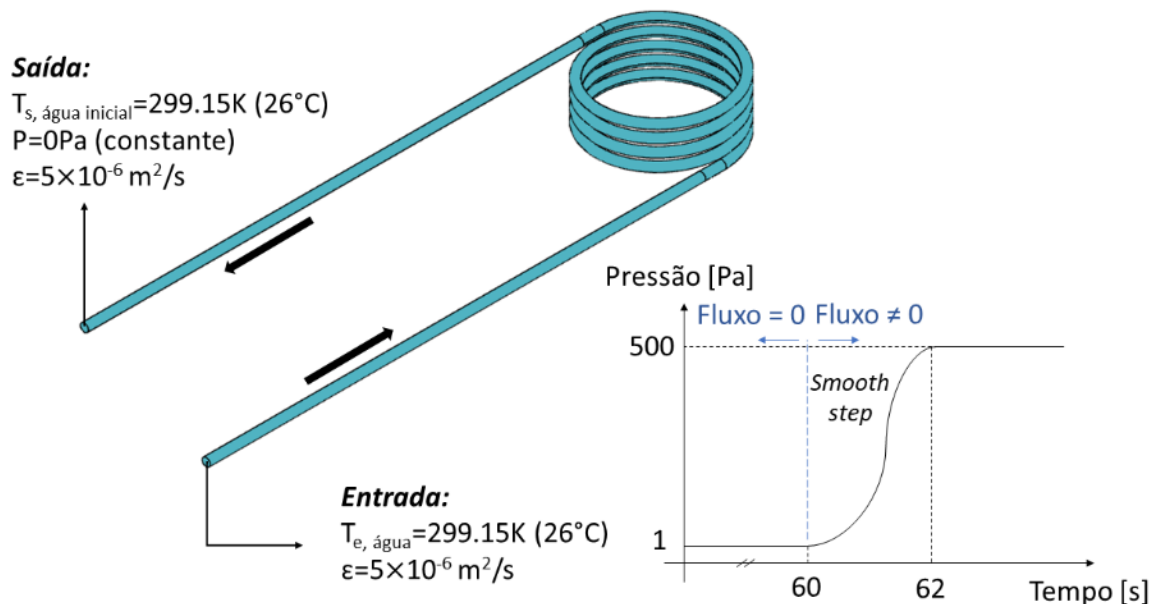


Figura 135 Síntese das condições fronteira aplicadas na massa de água (modelo fluídico).

Por fim, criou-se uma condição de fronteira de barreira (*Wall condition*) para delimitar as zonas por onde a massa de água circula. Assim, todas as superfícies deste modelo são "barradas" (a vermelho na Figura 136), à exceção das extremidades (a azul na Figura 136), que são as únicas entrada e saída de água.

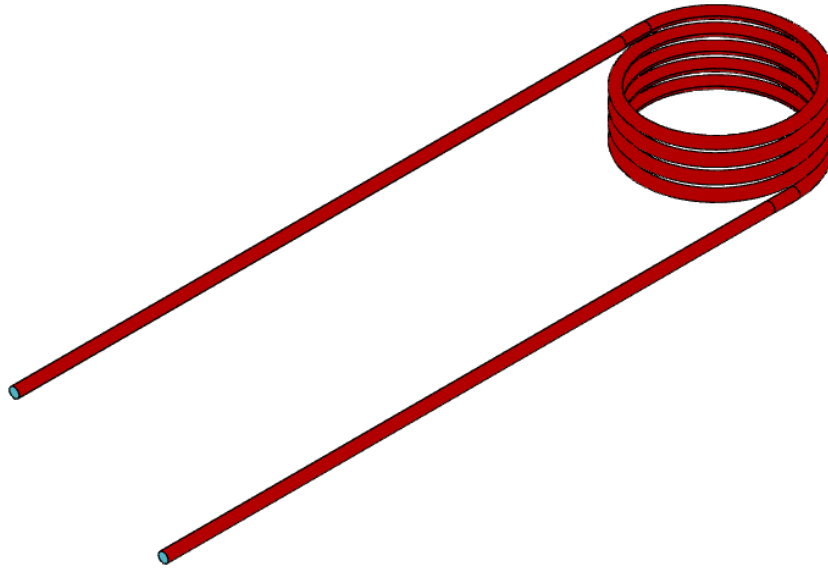


Figura 136 Condição barreira. A vermelho são assinaladas as superfícies "barradas" e a azul ficam as únicas entradas e saídas de água (as extremidades) [5].