



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo numérico do arrefecimento de um molde no processo de moldação de embalagens de vidro

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Fábio Alexandre Marques Guedes

Orientadores

**Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes
Engenheiro Vitor Miguel Martins**

Júri

Presidente Professor Doutor José Joaquim da Costa
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2017

“Do the difficult things while they are easy and do the great things while they are small. A journey of a thousand miles must begin with a single step”

Lao Tzu

“Success is a science; if you have the conditions, you get the result”

Oscar Wilde

Agradecimentos

À Santos Barosa – Vidros, S.A., Engenheiro Gilberto Pereira e Dr. Luís Tavares, por terem tornado possível a realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Vitor Miguel Martins, pela paciência, conhecimentos transmitidos e disponibilização de todos os meios necessários à elaboração desta Dissertação.

Ao Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes, pela total disponibilidade e ensinamentos proporcionados.

Ao Professor Doutor José Joaquim da Costa, pelo acompanhamento e pela referência como Docente.

A todos os Docentes e colegas de trabalho que têm contribuído para a minha formação académica e profissional.

Aos meus pais e ao meu irmão, Vitor, Alice e Tiago, pela presença, ajuda e compreensão.

À minha namorada, Dina Teixeira, por todo o apoio, amizade e companheirismo.

Resumo

A simulação numérica assume atualmente uma importância significativa nas áreas de projeto, investigação e desenvolvimento na medida em que os modelos computacionais permitem o estudo de modo versátil e detalhado de fenómenos físicos que, de outro modo, são por vezes de difíceis observação e análise. A sua utilização nas indústrias de processo, áreas cuja evolução está inevitavelmente dependente da experimentação e do conhecimento empírico, é hoje uma realidade. Deste modo, a indústria de produção de vidro de embalagem tem vindo a utilizar ferramentas de simulação computacional para otimizar alguns dos processos que mais influem no rendimento produtivo, nomeadamente, na modelação numérica dos fornos de fusão e da etapa de moldação. Porém, estes estudos de mecânica de fluidos computacional são ainda escassos e geralmente efetuados por empresas externas ligadas às áreas de projeto. Contrariando essa tendência, no presente trabalho recorre-se ao *software* Ansys® CFX para estudar numericamente o comportamento térmico de um molde de acabamento na fase de arrefecimento do processo cíclico de moldação de uma embalagem de vidro, uma garrafa de litro de cerveja. Com esse propósito, foram comparados moldes iguais de materiais diferentes: ferro fundido e bronze-alumínio. Verificou-se que o bronze-alumínio permite uma extração de calor mais eficaz durante o período de contacto entre o vidro e o molde, conduzindo a durações de moldação inferiores e aumentos de cadências de produção. Por interpretação das gamas de temperatura da moldação, foi elaborada uma análise aos pontos sensíveis à ocorrência de defeitos na garrafa moldada. Por fim, verificou-se que os regimes de escoamento do ar nos canais de arrefecimento são bastante expressivos, com elevados números de Reynolds e coeficientes de transmissão de calor. O estudo permitiu também a identificação de alguns aspetos de possível melhoria no projeto do molde.

Palavras-chave: Ansys® CFX, arrefecimento de moldes, bronze-alumínio, embalagem de vidro, moldação, simulação numérica.

Abstract

Numerical simulation currently assumes a significant importance in the areas of design, research and development, allowing, in many cases, the obtention of results at a lower cost than through the more classic experimental approach. Its use in process industries, areas whose evolution is inevitably dependent on experimentation and empirical knowledge, is now a reality. Thus, the packaging glass manufacturing industry has been using computer simulation tools to optimize some of the processes that most influence the productive yield, namely, in the numerical modeling of the melting furnaces and the molding stage. However, studies with computational fluid dynamics are still scarce, usually carried out by external companies of the design areas. The present work uses Ansys® CFX software for a numerical study of the heat transfer processes taking place in the molding of glass bottles. For this study, two molding materials were considered: cast iron and aluminum-bronze. It has been found that aluminum-bronze allows more efficient heat extraction during the contact time between the glass and the mold, leading to lower molding times and increases in production rates. Potential locations for the occurrence of defects in the molded bottle were anticipated through the analysis of the temperature fields. Finally, it has been found that the air flow in the cooling channels are characterized by high heat transfer rates, at large Reynolds numbers. The study also allowed the identification of some points for improvement in the mold design.

Keywords Aluminum-bronze, Ansys® CFX, glass packaging, mold cooling, molding, numerical simulation.

Índice

| | |
|--|-------|
| Índice de Figuras | xi |
| Índice de Tabelas | xv |
| Simbologia e Siglas | xvii |
| Simbologia..... | xvii |
| Siglas | xviii |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 2.1. O vidro | 3 |
| 2.1.1. Arrefecimento e variação de volume específico..... | 3 |
| 2.1.2. Variação de temperatura e viscosidade | 4 |
| 2.1.3. Transmissão calorífica | 9 |
| 2.2. Processo produtivo..... | 10 |
| 2.3. Etapa de moldação | 13 |
| 2.4. Ferramentas moldantes | 18 |
| 2.4.1. Materiais | 20 |
| 2.5. Formas de transmissão de calor | 21 |
| 2.5.1. Condução | 22 |
| 2.5.2. Convecção | 25 |
| 2.5.3. Radiação | 27 |
| 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 29 |
| 3.1. Caracterização da embalagem em estudo | 29 |
| 3.2. Termografia e gamas de temperatura..... | 30 |
| 3.3. Caudal do ar de arrefecimento | 33 |
| 4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA | 37 |
| 4.1. Domínios e propriedades | 37 |
| 4.1.1. Molde..... | 38 |
| 4.1.2. Garrafa | 39 |
| 4.1.3. Arrefecimento | 39 |
| 4.2. Hipóteses de simplificação adotadas | 41 |
| 4.3. Discretização espacial dos domínios | 42 |
| 4.4. Discretização temporal da simulação | 46 |
| 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS..... | 51 |
| 5.1. Determinação da resistência térmica de contacto entre o vidro e a face moldante | 51 |
| 5.1 | |
| 5.2. Análise comparativa entre moldes de ferro fundido e bronze-alumínio..... | 51 |
| 5.2.1. Variação de temperatura na face da garrafa | 51 |
| 5.2.2. Variação de temperatura na face moldante..... | 53 |
| 5.2.3. Distribuição geral de temperaturas | 55 |
| 5.2.4. Discussão de resultados | 57 |

| | |
|--|----|
| 5.3. Temperaturas na embalagem e ocorrência de defeitos..... | 58 |
| 5.3.1. Discussão de resultados..... | 59 |
| 5.4. Estudo do arrefecimento..... | 60 |
| 5.4.1. Discussão de resultados..... | 65 |
| 6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURA..... | 67 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 71 |
| ANEXO A..... | 75 |
| ANEXO B..... | 77 |
| ANEXO C..... | 79 |
| ANEXO D..... | 81 |
| ANEXO E..... | 83 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1. Volume específico em função da temperatura na solidificação de materiais cristalinos e vítreos [4]. | 3 |
| Figura 2.2. Curvas de viscosidade em função da temperatura para sílica fundida e 3 vidros diferentes, com destaque para o vidro sodocálcico (a laranja) [5]. | 6 |
| Figura 2.3. Contribuição da condução e da radiação para a transmissão total de calor num vidro sodocálcico [7]. | 9 |
| Figura 2.4. Forno do tipo <i>end fired</i> regenerativo (adaptado de [1][14]); 1 – Conduta de exaustão/Entrada de ar de combustão; 2 – Empilhagem do regenerador; 3 – Abóboda do regenerador e isolamento; 4 – <i>Port Neck</i> direito; 5 – Rampa direita dos queimadores; 6 – Parede anterior do tanque; 7 – Boca de enfora; 8 – Soleira; 9 – Parede lateral esquerda do tanque, 10 – Abóboda do tanque e isolamento; 11 – Camadas de isolamento da soleira; 12 – Garganta; 13 – Zona de trabalho; 14 – Canal ou <i>forehearth</i> ; 15 – Zona do <i>feeder</i> . | 11 |
| Figura 2.5. Mecanismo do <i>feeder</i> (adaptado de [1][15]); 1 – Braço de suporte do punção; 2 – Punção; 3 – Camisa; 4 – Bacia; 5 – Batente da bacia; 6 – Orifício; 7 – Cobertura. | 12 |
| Figura 2.6. Formação da gota pelas tesouras (adaptado de [1]); 1 e 2 – Descida do punção; 3 – Fim do curso do punção; 4 – Início da subida do punção (que cria um efeito de sucção) e do corte pelas tesouras; 5 – Fim do corte pelas tesouras e continuação da subida do punção. | 13 |
| Figura 2.7. Nomenclatura de uma garrafa de vidro (adaptado de [16]). | 13 |
| Figura 2.8. Máquina <i>Individual Section</i> da Bucher Emhart Glass (adaptado de [17]); Caixa a vermelho – Secção individual; Caixa a amarelo – Controlos da secção (do lado de acabar). | 14 |
| Figura 2.9. Moldação do vidro de embalagem (adaptado de [18]); 1 – Molde de começar ou contra-molde; 2 – Molde de marisa; 3 – Bico; 4 – Tampão; 5 – Molde de acabar; 6 – Fundo; 7 – Cabeça de sopro. | 14 |
| Figura 2.10. Molde de marisa [20]. | 19 |
| Figura 2.11. Molde de começar ou contra-molde [21]; 1 – Duas metades (macho e fêmea); 2 – Tampão; 3 – Válvula do tampão; 4 – Furos para passagem do ar de arrefecimento. | 19 |
| Figura 2.12. Molde de acabar [22]; 1 – Duas metades (macho e fêmea); 2 – Fundo; 3 – Furos para passagem do ar de arrefecimento; 4 – Furos do sistema de vácuo na face moldante; 5 – Canais de vácuo na junta do corpo. | 20 |
| Figura 2.13. Formas de transmissão de calor na moldação de vidro de embalagem (Adaptado de [25]). | 22 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.1. Modelo de embalagem utilizada na simulação numérica – Garrafa para 1 litro de cerveja [37]. | 29 |
| Figura 3.2. Perfis de temperatura nos moldes e no vidro durante a moldação de uma embalagem de vidro [38]. | 30 |
| Figura 3.3. Termografia por infravermelhos ao esboço de vidro. | 32 |
| Figura 3.4. Termografias à face dos moldes de acabar; a) Cavidade de fora; b) Cavidade de dentro. | 32 |
| Figura 3.5. Termografia por infravermelhos à garrafa moldada, no momento de abertura do molde. | 33 |
| Figura 3.6. Curva de funcionamento do ventilador. | 35 |
| Figura 4.1. Domínios de simulação no Ansys® CFX; a) Molde; b) Garrafa; c) Arrefecimento. | 37 |
| Figura 4.2. Estudo de independência de malha; a) Temperatura máxima na face do molde em função do número de nodos; b) Valor máximo do perfil de velocidades do ar nos furos de arrefecimento do molde (num plano a 220mm do fundo) em função do número de nodos. | 43 |
| Figura 4.3. Vista geral relativamente à malha final do conjunto. | 45 |
| Figura 4.4. Pormenores da malha final; a) Pormenor relativo à dimensão da malha e às zonas de contacto vidro-molde; b) Corte transversal aos canais de arrefecimento e às zonas de contacto vidro-molde. | 46 |
| Figura 4.5. Resíduos relativos à “Simulação 1”; a) Massa e <i>momentum</i> ; b) Energia. | 48 |
| Figura 4.6. Resíduos relativos à “Simulação 2”; a) Massa e <i>momentum</i> ; b) Energia. | 48 |
| Figura 4.7. Resultados de <i>Imbalance</i> obtidos na “Simulação 1” para os diferentes domínios; a) Arrefecimento; b) Molde; c) Garrafa. | 49 |
| Figura 4.8. Resultados de <i>Imbalance</i> obtidos na “Simulação 2” para os diferentes domínios; a) Arrefecimento; b) Molde; c) Garrafa. | 49 |
| Figura 5.1. Variação das temperaturas máxima e mínima na face da Garrafa - molde em bronze-alumínio. | 52 |
| Figura 5.2. Variação das temperaturas máxima e mínima na face da Garrafa - molde em ferro fundido. | 53 |
| Figura 5.3. Variação das temperaturas máxima e mínima na face moldante - molde em bronze-alumínio. | 54 |
| Figura 5.4. Variação das temperaturas máxima e mínima na face moldante - molde em ferro fundido. | 54 |
| Figura 5.5. Distribuição de temperaturas em toda a área de moldação; a) Molde em bronze-alumínio; b) Molde em ferro fundido. | 55 |
| Figura 5.6. Isotérmicas em corte transversal no molde em bronze-alumínio – zona do peito; a) Plano de junta do molde; b) Furos de arrefecimento; c) Canal de vácuo principal na zona da junta do corpo; d) Canal de vácuo secundário. | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.7. Distribuição de temperaturas na garrafa moldada; a) Zona do peito; b) Zona da junta do corpo. | 58 |
| Figura 5.8. Distribuição de temperaturas no fundo da garrafa; a) Zona do calcanhar; b) Zona do fundo. | 59 |
| Figura 5.9. Perfis de velocidade do ar de arrefecimento nos furos do molde; a) Furo de 6mm de diâmetro; b) Furos de 7mm de diâmetro; c) Furos de 7,5mm de diâmetro; d) Furos de 8,5mm de diâmetro..... | 60 |
| Figura 5.10. Linhas de fluxo do ar de arrefecimento; a) Vista geral; b) Pormenor relativo à saída do ar na carreira exterior de furos. | 62 |
| Figura 5.11. Vetores de velocidade do ar na saída por um furo da carreira interior; a) Molde com difusor; b) Molde sem difusor..... | 63 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1. Pontos típicos da curva de viscosidade em função da temperatura e correspondentes etapas do processo vidreiro (adaptado de [1]). | 7 |
| Tabela 2.2. Típica gama de propriedades dos materiais utilizados no fabrico dos moldes para vidro de embalagem [24]. | 21 |
| Tabela 3.1. Características físicas e parâmetros de máquina relativos à moldação da garrafa em estudo. | 30 |
| Tabela 3.2. Parâmetros de ajuste da câmara para a obtenção das termografias por infravermelhos [39]. | 31 |
| Tabela 3.3. Temperaturas iniciais do molde e do vidro. | 33 |
| Tabela 3.4. Parâmetros de funcionamento do ventilador. | 34 |
| Tabela 3.5. Condições iniciais e de fronteira para o ar de arrefecimento (por meio molde) [40]. | 36 |
| Tabela 4.1. Propriedades termofísicas do bronze-alumínio utilizadas na simulação numérica [11]. | 38 |
| Tabela 4.2. Propriedades termofísicas do ferro fundido utilizadas na simulação numérica [11]. | 38 |
| Tabela 4.3. Propriedades termofísicas do vidro utilizadas na simulação numérica [11]. | 39 |
| Tabela 4.4. Dimensionamento da malha final. | 44 |
| Tabela 4.5. Dimensão das <i>Inflation Layers</i> relativas à face do molde e ao ar de arrefecimento nos furos. | 46 |
| Tabela 4.6. Parâmetros de cálculo utilizados na “Simulação 1” e na “Simulação 2”. | 47 |
| Tabela 4.7. Valores de interesse considerados para análise de convergência de resultados. | 50 |
| Tabela 5.1. Termos comparativos entre a utilização de moldes em ferro fundido e bronze-alumínio. | 57 |
| Tabela 5.2. Dimensões características e valores de velocidade e caudal volúmico nas diferentes gamas de furos. | 61 |
| Tabela 5.3. Valores de caudal mássico e Reynolds avaliados às propriedades de temperatura média do ar existente nas diferentes gamas de furos [6]. | 63 |
| Tabela 5.4. Potências térmicas e coeficientes de transmissão de calor por convecção observados nas diferentes gamas de furos [6]. | 64 |

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

\AA – Ångström, 10^{-10} m

A – Fator de frequência

A_{\perp} – Área perpendicular ao fluxo de calor por condução, m^2

A_s – Área superficial ou de contacto, m^2

C_p – Calor específico a pressão constante, $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

d – Diâmetro, m

dT/dx – Gradiente de temperatura em condução, K.m^{-1}

dv/dx – Gradiente de velocidades, m.s^{-1}

F – Força, N

h – Coeficiente de transmissão de calor por convecção, $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

K – Condutibilidade térmica, $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

P – Poise, $\text{g.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}$

P_t – Patamar de trabalho

Q – Energia de ativação, J

\dot{Q} – Potência térmica, W

\dot{Q}/A – Fluxo térmico, W.m^{-2}

R – Constante universal dos gases perfeitos, $8,314472 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

R_c – Resistência térmica de contacto, $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$

Re – Número de Reynolds

T – Temperatura, K

T_D – Temperatura de deformação, K

T_f – Temperatura de fusão, K

T_{ft} – Temperatura inferior de trabalhabilidade, K

T_g – Temperatura de transição vítrea, K

T_{∞} – Temperatura do fluido em escoamento, K

T_{IR} – Temperatura inferior de recozimento, K

- T_{it} – Temperatura superior de trabalhabilidade, K
 T_L – Temperatura de Littleton, K
 T_s – Temperatura superficial, K
 T_{SR} – Temperatura superior de recozimento, K
 T_{viz} – Temperatura da vizinhança, K
 u_τ – Velocidade de atrito, $m.s^{-1}$
 v – Velocidade, $m.s^{-1}$
 V_a – Velocidade de arrefecimento, $m.s^{-1}$
 y – Coordenada cartesiana, m
 y^+ – Distância adimensional do primeiro nó à parede
 α – Difusividade térmica, $m^2.s^{-1}$
 $\Delta_{3.7}$ – Intervalo térmico de trabalhabilidade do vidro, K
 ΔT_{int} – Diferença de temperaturas na interface, K
 ε – Emissividade
 η – Coeficiente de viscosidade
 μ – Viscosidade dinâmica, $kg.m^{-1}.s^{-1}$
 ν – Viscosidade cinemática, $m^2.s^{-1}$
 ρ – Massa volúmica, $kg.m^{-3}$
 σ – Constante de Stefan-Boltzmann, $5,670.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$

Siglas

- CFD – *Computational Fluid Dynamics*
CGS – Centímetro-Grama-Segundo
IS – *Individual Section*
SST – *Shear Stress Transport*

1. INTRODUÇÃO

A indústria de vidro de embalagem é um setor com tremendo impacto económico ao nível nacional. A existência em Portugal de seis unidades fabris destinadas à produção de vidro oco, colocam o país como um dos maiores produtores europeus destes artigos, com cerca de 16 milhões de embalagens produzidas diariamente [1][2]. Deste modo, as empresas vidreiras nacionais são essencialmente exportadoras, contribuindo de forma intensiva para o aumento de competitividade e desenvolvimento económico. De resto, dada a necessidade de ferramentas moldantes, esta indústria foi a grande responsável pelo surgimento do setor dos moldes e, deste modo, de forma indireta, pelo setor de produção de plásticos, duas indústrias que constituem um dos *clusters* nacionais com maior progressão nos anos recentes [3].

A indústria de vidro de embalagem possui elevada incorporação de tecnologia, tanto ao nível dos fornos de fusão, das máquinas de produção e inspeção de produto, como de todos os equipamentos auxiliares. No entanto, sendo uma indústria destinada à produção em massa de produtos *standardizados*, os seus esforços são concentrados ao nível do volume produtivo e da satisfação da carteira comercial, o que faz com que a evolução do processo de desenvolva essencialmente de forma empírica. As áreas de projeto e investigação e desenvolvimento são geralmente secundárias, ficando quase à inteira responsabilidade das escassas empresas que se constituíram com esse desígnio, em particular, as que se dedicam à construção dos equipamentos relacionados com a produção. Estas empresas, destinadas principalmente à comercialização de equipamento de produção e de inspeção de garrafas, dedicam-se também, mas de forma menos intensa, ao estudo do processo, fornecendo indicações ao nível do projeto e desenvolvimento de moldes e de parâmetros produtivos. Estes serviços não são geralmente realizados *in situ*, o que faz com que não sejam personalizados e de acordo com as reais condições de cada empresa. Por outro lado, tratam-se de estudos exclusivos pelos quais se pretendam cobrar, acarretando assim custos elevados num serviço em que as empresas de vidro de embalagem geralmente não investem significativamente.

Com base no exposto, surge o tema da presente Dissertação. Numa indústria que possui uma multiplicidade de temas passíveis de estudo e de investigação, pretende-se

estudar aquela que é, talvez, a etapa crucial de todo o processo de fabrico do vidro de embalagem: a moldação. Deste modo, com recurso ao *software* Ansys® CFX, pretende-se simular o comportamento do ar durante o arrefecimento do molde e a fase de contacto do vidro durante a moldação.

Neste trabalho não se pretende explorar intensivamente o programa de simulação numérica, nem tão pouco as equações que regem os fenómenos físicos. Trata-se antes de apresentar todas as variáveis envolvidas, e correspondente influência, nesta etapa que é, de certo, a que maiores conhecimentos exige ao nível da compreensão de todo o processo de fabrico do vidro de embalagem e onde os conceitos de transmissão de calor e mecânica de fluidos assumem uma extraordinária importância.

Para além de perceber as temperaturas e perfis térmicos envolvidos, pretende-se perceber o comportamento adotado pelo ar nos furos de arrefecimento, retirando informações importantes para a área de projeto de moldes. Apresenta-se a comparação entre a utilização de moldes em ferro fundido e em bronze-alumínio, material que tem assumido um papel importante nos aumentos das cadências de produção devido às suas melhoradas propriedades termofísicas e mecânicas.

Com recurso a referências bibliográficas e a condições de fabrico reais, tornou-se possível obter todos os parâmetros e condições para uma simulação numérica bastante satisfatória, obviamente considerando um inevitável conjunto de simplificações.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O vidro

Os vidros são materiais inorgânicos termodinamicamente metaestáveis, geralmente considerados sólidos não cristalinos ou sólidos amorfos. Embora à temperatura ambiente e dada a sua rigidez mecânica, tenham a aparência de corpos sólidos, a ausência de uma estrutura cristalina característica do estado sólido, inviabiliza que os vidros sejam corretamente definidos em termos estruturais. Com efeito, a denominação de sólido amorfo decorre deste facto, a inexistência de regularidade nos seus constituintes moleculares e de ordem a longas distâncias. As moléculas alternam aleatoriamente ao longo da respetiva rede e a distância média entre átomos de silício em sílica vítrea (SiO_2) é cerca de $3,6 \text{ \AA}$, não existindo ordem entre estes átomos a distâncias superiores a cerca de 10 \AA [1][4].

2.1.1. Arrefecimento e variação de volume específico

A solidificação dos vidros difere do que ocorre nos sólidos cristalinos. A Figura 2.1 apresenta o gráfico do volume específico em função da temperatura para estes dois tipos de materiais [4].

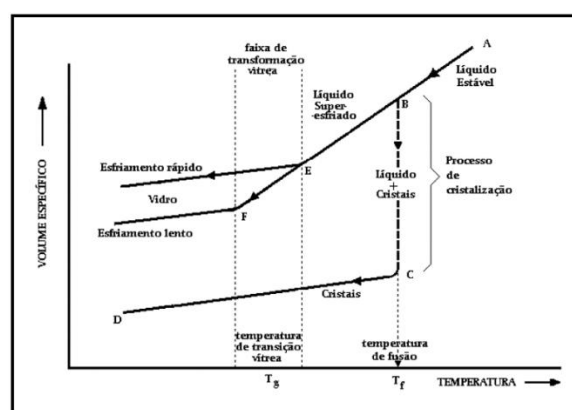


Figura 2.1. Volume específico em função da temperatura na solidificação de materiais cristalinos e vítreos [4].

O trajeto ABCD representa a curva de solidificação de um material cristalino, enquanto que a curva AEF representa a de um material vítreo. Verifica-se que,

contrariamente ao sucedido com os materiais cristalinos, o líquido vítreo, ao arrefecer, não apresenta diminuição brusca do seu volume específico, característica da cristalização em T_f . A sua curva de arrefecimento tem, no entanto, uma maior inclinação, pois os átomos da rede vítrea continuam com maior liberdade de movimento comparativamente aos da rede cristalina após solidificação. Com efeito, o líquido vítreo vai tornando-se rapidamente mais viscoso com a diminuição da sua temperatura, constituindo um líquido sobreaquecido. No fim da transição vítrea, a viscosidade é tão alta que impossibilita qualquer movimentação molecular. A partir desse momento, o material apresenta a estabilidade dimensional de um sólido, com as características de um líquido. A transição vítrea, T_g , depende da composição química do vidro e é tanto mais alta quanto maior for a velocidade de arrefecimento [1][4].

Como se pode verificar, a temperatura de transição vítrea é na realidade uma faixa que assume diversos valores de acordo com a velocidade de arrefecimento do material. Quando uma dada quantidade de vidro sofre um arrefecimento rápido, a sua estrutura molecular tem menos tempo de se ordenar, resultando num maior volume e menor densidade comparativamente à mesma massa de vidro arrefecida lentamente. Esta particularidade é de extrema importância no processo vidreiro. Durante a fase de moldação de uma garrafa, o vidro vai arrefecer em contacto com a face do molde. No entanto, sendo a garrafa um artigo oco, verifica-se que a película externa em contacto com o molde arrefece mais rapidamente do que a face interior que está em contacto com o ar, mau condutor térmico. Deste modo, no mesmo corpo, coexistem massas que arrefeceram de forma diferenciada e, inerentemente, a ocupar volumes diferentes, originando tensões. Estas tensões são decorrentes do processo e geralmente são reduzidas até valores desprezáveis durante a fase de recozimento, que consiste no aquecimento da garrafa até T_g , homogeneização da temperatura e posterior arrefecimento controlado até à temperatura ambiente. Esta etapa começa a ser realizada alguns segundos após o término da moldação [4].

2.1.2. Variação de temperatura e viscosidade

Poderiam ser enumeradas diversas propriedades dos vidros, no entanto, a viscosidade é, provavelmente, a propriedade mais importante na tecnologia vidreira. Matematicamente pode ser obtida através da equação de Newton para a viscosidade, em que F é a força exercida entre duas superfícies paralelas e é proporcional à superfície de contacto,

A_s , ao gradiente de velocidades dv/dx e ao coeficiente de viscosidade, η , que é dependente da composição do vidro [1]:

$$F = \eta \cdot A_s \cdot \frac{dv}{dx} \quad (2.1)$$

As dimensões adotadas na prática vidreira para a viscosidade são no sistema CGS, ou seja, em Poise ($1 \text{ P} = 1 \text{ g.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}$) [1].

Tendo a viscosidade uma relação direta com a temperatura, T , pode ser obtida pela equação de Arrhenius [1]:

$$\eta(T) = A \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.2)$$

em que A , representa um fator de frequência, Q , a energia de ativação, e R é a constante universal dos gases perfeitos.

Por outro lado, a equação de Vogel-Fulcher-Tamman é a mais amplamente reconhecida como descritiva da viscosidade em vidros sodocálcicos industriais [1]:

$$\text{Log}(\eta) = A + \frac{B}{T - T_0} \quad (2.3)$$

onde A , B e T_0 são constantes independentes da temperatura.

O aprofundamento desta temática foge ao âmbito da presente Dissertação, no entanto, considera-se importante a apresentação destas equações por forma a introduzir as curvas de viscosidade descritivas dos processos vidreiros. A viscosidade determina as condições de todas as etapas na produção vidreira, desde a fusão das matérias primas, às temperaturas de recozimento, passando pelas temperaturas de conformação.

A temperatura de fusão é aquela na qual o vidro apresenta um nível de fluidez que permita a homogeneização dos seus constituintes químicos e a eliminação de gases, em forma de bolhas. Na fase de moldação, ou conformação do produto, a viscosidade deve permitir a fácil deformação do vidro, mas deve ser alta o suficiente para ser possível preservar a forma do produto. No fim da conformação, a viscosidade terá de ser suficientemente elevada de maneira a que a peça não sofra deformação. Depreende-se portanto, a necessidade de fornecer às máquinas de moldação um vidro com temperatura e, inerentemente, viscosidade controladas e, preferencialmente constantes. O não cumprimento desta premissa induz à ocorrência de problemas produtivos, nomeadamente defeitos

dimensionais. Neste âmbito surge o conceito “trabalhabilidade”, usado para descrever a maior ou menor facilidade de conformação dos produtos vidreiros [1].

Tratando-se de um processo com um grande número de variáveis e condicionantes, é de aceitação geral a enorme dificuldade no cumprimento dos patamares de trabalho e numa clara definição quantitativa da “trabalhabilidade” de um determinado vidro, considerando-se antes a adoção de intervalos de trabalho, obtidos experimentalmente e variando de acordo com a empresa e seus objetivos ao nível da exploração rentável do processo [1].

Dada a importância desta temática para a compreensão do processo de fabrico, é apresentada a Figura 2.2, na qual se encontram representadas curvas de viscosidade para diferentes tipos de vidro, com destaque para o vidro sodocálcico (a laranja), que devido à sua composição apresenta um maior intervalo de temperaturas e, como tal, está adaptado à produção industrial do vidro de embalagem.

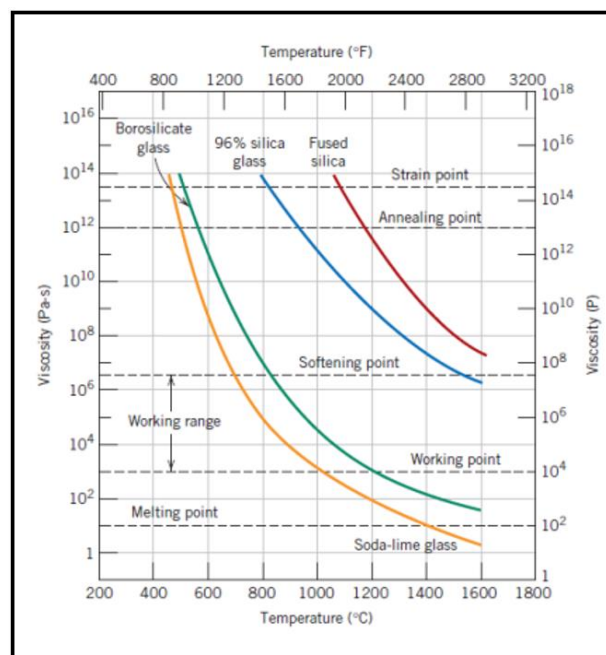


Figura 2.2. Curvas de viscosidade em função da temperatura para sílica fundida e 3 vidros diferentes, com destaque para o vidro sodocálcico (a laranja) [5].

Na Tabela 2.1 apresentam-se os vários pontos da curva de viscosidade em função da temperatura referentes às etapas do processo de fabrico de um vidro sodocálcico industrial. Devido às diferenças entre autores, os referidos pontos podem variar, assim como as temperaturas que são dependentes da composição química.

Tabela 2.1. Pontos típicos da curva de viscosidade em função da temperatura e correspondentes etapas do processo vidreiro (adaptado de [1]).

| Viscosidade, η [P] | Designação da temperatura | Etapa do processo vidreiro | Gama típica de temperaturas[°C] |
|-------------------------|--|---|---------------------------------|
| $10^{1,65}$ | Superfície do vidro no forno | Fusão | 1575 - 1620 |
| $10^{2,0}$ | Zona de afinação | Afinação | 1480 |
| $10^{2,5}$ | Temperatura da zona de afinação para a zona de trabalho | Transporte nos canais até à máquina de moldação | 1300 - 1340 |
| $10^{3,0}$ | Temperatura de gota ou temperatura superior de trabalhabilidade, T_{it} | Formação da gota | 1200 - 1220 |
| $10^{4,0}$ | Temperatura de trabalho | Moldação | 1050 |
| $10^{7,0}$ | Temperatura inferior de trabalhabilidade, T_{ft} | Abertura do molde de acabar | 770 - 780 |
| $10^{7,7}$ | Temperatura de amolecimento ou de Littleton, T_L | Extração do artigo do interior do molde | 740 |
| $10^{11,6}$ | Temperatura de deformação, T_D | Vidro no transportador da máquina | 600 |
| $10^{13,4}$ | Temperatura superior de recozimento, ou “ <i>Annealing Point</i> ”, T_{SR} | Recozimento | 560 - 580 |
| $10^{14,6}$ | Temperatura inferior de recozimento, ou “ <i>Straint Point</i> ”, T_{IR} | Recozimento | 540 |

À viscosidade de $10^{1.65}$ P, o vidro em fusão no interior do forno, não retém qualquer forma, estando num estado semelhante a um líquido. À temperatura correspondente a $10^{2.0}$ P ocorre a afinação, etapa que se caracteriza pela libertação de gases e homogeneização térmica. Esta etapa estende-se ligeiramente ao longo do percurso que o vidro efetua desde o forno pelos canais de alimentação até à máquina de moldação. A formação da gota marca a primeira fase do processo de conformação e ocorre quando o vidro atinge a viscosidade de $10^{3.0}$ P. Entre os $10^{3.0}$ P e os $10^{7.0}$ P, ou seja, entre a temperatura superior de trabalhabilidade e a temperatura inferior de trabalhabilidade ou de abertura do molde, decorre o intervalo térmico de trabalhabilidade do vidro [1]:

$$\Delta_{3-7} = T_{it} - T_{ft} \quad (2.4)$$

O conhecimento das temperaturas correspondentes a estes valores de viscosidade são de extrema importância para a regulação do processo de fabrico. Com efeito, é possível determinar o intervalo de tempo desta variação de viscosidade através da equação do patamar de trabalho, P_t , que se relaciona com a velocidade de arrefecimento do vidro, V_a [1]:

$$P_t = \frac{\Delta_{3-7}}{V_a} \quad (2.5)$$

A velocidade de arrefecimento do vidro é função das suas propriedades termofísicas (condutibilidade térmica, densidade, calor específico) e químicas (composição), das temperaturas dos órgãos mecânicos pelos quais passa e, principalmente, das temperaturas e propriedades termofísicas das ferramentas moldantes.

Continuando o arrefecimento do vidro, à viscosidade de $10^{7.7}$ P, atinge-se o ponto de amolecimento. Abaixo desta viscosidade o vidro não mais deforma por ação do seu próprio peso e o artigo pode ser extraído do molde. Aos $10^{11.6}$ P, ou T_D , os produtos moldados podem ser empurrados mecanicamente para o tapete que os encaminhará até à arca de recozimento. No início deste processo de eliminação de tensões, a viscosidade deverá situar-se em $10^{13.4}$ P, que corresponde à temperatura superior de recozimento. À viscosidade de $10^{14.6}$ P, ou temperatura inferior de recozimento, ocorre o fim das deformações viscoelásticas, obtendo-se um produto sólido e rígido, teoricamente sem tensões internas [1].

Como se verá adiante, o processo vidreiro é complexo e sujeito a múltiplas variáveis, observando-se experimentalmente que existe alguma diferença entre as gamas de

temperatura descritas pelas curvas de viscosidade e o que ocorre na realidade. Estas curvas são, no entanto, ferramentas que fornecem indicação preciosa no que toca à caracterização e controlo do processo produtivo, em particular, à etapa de moldação.

A descrição e análise dos vários parâmetros vidreiros, de critérios de trabalhabilidade dos vidros, de modelos de viscosidade e das evoluções que têm ocorrido ao nível das composições químicas dos vidros de embalagem, são assuntos de grande interesse prático e que influem decisivamente sobre a rentabilidade do processo produtivo, nomeadamente sobre a etapa de moldação, mas que fogem ao âmbito do presente trabalho. Existe no entanto profícua investigação neste domínio.

2.1.3. Transmissão calorífica

À temperatura ambiente, a condutibilidade térmica para um vidro sodocálcico comum é cerca de $1,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [6]. Este baixo valor, associado a uma pequena contribuição da radiação, tornam o vidro num bom isolante a baixas temperaturas.

Como se pode verificar na Figura 2.3, para temperaturas baixas, o mecanismo de transmissão de calor preponderante é a condução, não existindo grande influência da radiação. No entanto, para temperaturas superiores, nas quais existe emissão luminosa, a transmissão por radiação torna-se importante, sendo quase exclusiva para temperaturas acima dos 1000 °C [7].

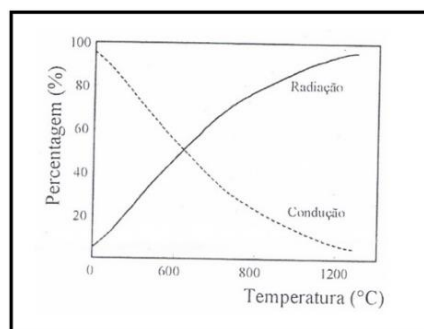


Figura 2.3. Contribuição da condução e da radiação para a transmissão total de calor num vidro sodocálcico [7].

Às temperaturas de moldação, a radiação ainda assume uma parcela muito importante na transmissão de calor, no entanto, vai diminuindo à medida que a temperatura da massa vítrea vai descendo e a contribuição da condução vai aumentando. Perto dos 600 °C , as contribuições são cerca de 50% para ambas as formas [7]. A coexistência dos dois

mecanismos de transmissão de calor, leva a que se considere uma condutibilidade térmica efetiva, que tem em linha de conta os coeficientes de transferência de calor por condução e por radiação associados. Existem na literatura várias contribuições para a determinação destes coeficientes de transmissão de calor, equações empíricas e em função da composição dos vidros [8][9][10]. No entanto, esta abordagem foge aos objetivos do presente texto.

Neste sentido, poucos são os estudos que abordam as dificuldades surgidas ao nível do valor de condutibilidade térmica efetiva a utilizar em simulação numérica da moldação de vidro. No entanto, as referências indicam um valor constante de $2,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ como sendo uma boa aproximação para a etapa da moldação [11][12].

2.2. Processo produtivo

Tecnologicamente, o processo produtivo tem evoluído a par das alterações nas composições químicas. Na moldação manual, atualmente escassa, a conformação está dependente de um patamar de trabalho amplo que possibilite a utilização de ferramentas manuais e o sopro com cana por parte do vidreiro. À medida que a tecnologia evoluiu, com a automatização do processo de fabrico e os necessários aumentos das cadências produtivas para fazer face às solicitações comerciais, tornou-se necessário adaptar as composições para se obterem vidros com curtos períodos de trabalhabilidade. Deste modo, atualmente o vidro de embalagem apresenta uma composição química semelhante à apresentada no ANEXO A, na qual é também apresentada de forma sucinta a função de cada constituinte [1][4][13]. De salientar a cada vez maior incorporação de casco (vidro obtido da reciclagem e da rejeição de produto não conforme no decurso do processo) motivado essencialmente por questões ambientais. Com efeito, a sua utilização conduz ao menor consumo de recursos minerais e energéticos necessários à fusão, com a conseqüente redução das emissões poluentes e custos económicos [1][13].

As diferentes matérias-primas são armazenadas em silos de grandes dimensões. De acordo com a cor e características do vidro a produzir, os diferentes constituintes são pesados, misturados e conduzidos até à boca da enforna. Os fornos são construídos com material refratário resistente às altas temperaturas que se verificam no seu interior e que ascendem a $1600 \text{ }^\circ\text{C}$. São, geralmente, do tipo regenerativo *end-fired*, com queimadores a produzirem chama em U e de produção contínua (24 horas por dia, 365 dias por ano).

A Figura 2.4 apresenta um forno do tipo regenerativo *end-fired*.

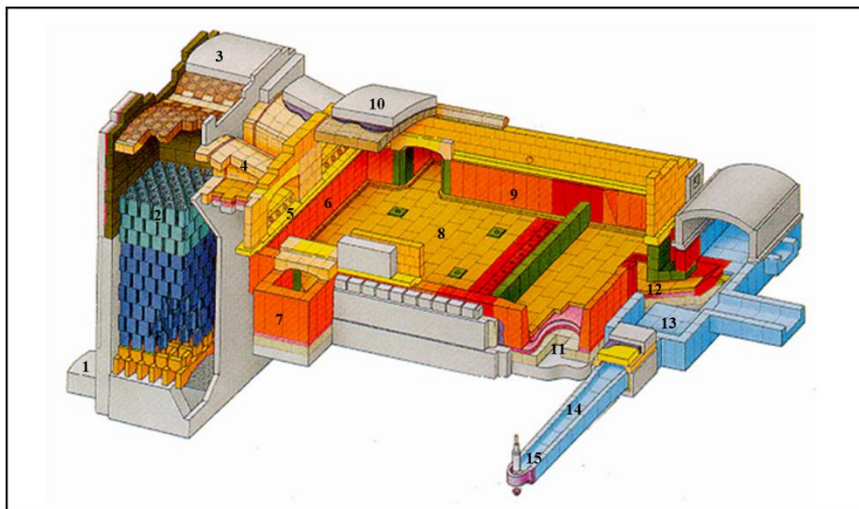


Figura 2.4. Forno do tipo *end fired* regenerativo (adaptado de [1][14]); 1 – Conduto de exaustão/Entrada de ar de combustão; 2 – Empilhagem do regenerador; 3 – Abóboda do regenerador e isolamento; 4 – *Port Neck* direito; 5 – Rampa direita dos queimadores; 6 – Parede anterior do tanque; 7 – Boca de enforna; 8 – Soleira; 9 – Parede lateral esquerda do tanque; 10 – Abóboda do tanque e isolamento; 11 – Camadas de isolamento da soleira; 12 – Garganta; 13 – Zona de trabalho; 14 – Canal ou *forehearth*; 15 – Zona do *feeder*.

Conforme ilustrado, existem duas rampas de queimadores. Enquanto uma rampa está em funcionamento, a outra está desligada. O ar de combustão que segue para a rampa de queimadores em funcionamento, entra pela conduta de entrada de ar e passa através da empilhagem de material refratário, detentor de elevada capacidade térmica. Esta empilhagem foi aquecida pelos gases de exaustão do ciclo anterior, durante o qual a outra rampa de queimadores esteve acionada. Este ciclo repete-se a cada 20 minutos. Por possibilitar o pré-aquecimento do ar de combustão, este ciclo promove de forma evidente a eficiência energética nos modernos fornos de combustão. Por outro lado, os fornos estão hoje em dia dotados de sistemas de *boosting* eléctrico de maneira a aumentar a produção em toneladas de vidro fundido e a diminuir as emissões gasosas. As pesagens e misturas, o nível constante de vidro no tanque de fusão, as temperaturas, entre outros parâmetros, são continuamente controlados por modernos sistemas de monitorização e controlo [1].

A fusão e afinação da mistura vitrificável são promovidas pelas correntes convectivas originadas pelos gradientes térmicos. As chamas aquecem a mistura à superfície. No entanto, junto às zonas de contacto com as paredes do forno, encontra-se vidro que tende a arrefecer, aumentando a densidade. Este vidro mais denso afunda e empurra o que se encontra junto à soleira. Este, por sua vez, ao ser empurrado irá subir fazendo com que o

vidro mais quente se mova à superfície para junto das paredes, arrefecendo [13]. À medida que estes fluxos ocorrem, o vidro, por efeito da gravidade e do gradiente térmico existente no forno, vai-se homogeneizando e encaminhando no sentido da garganta. Neste local, dada a sua conceção geométrica, é favorecido o avanço do vidro afinado para a zona de trabalho. Nesta zona, o vidro continua o seu percurso pelos canais ou *forehearth* até chegar ao *feeder*, sistema que se encontra representado na Figura 2.5.

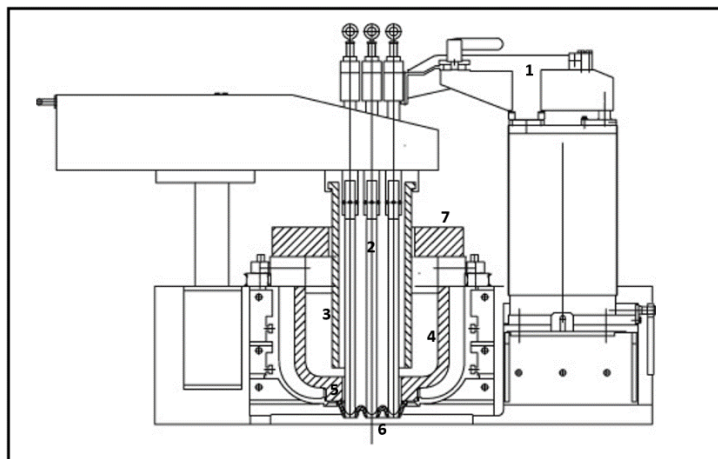


Figura 2.5. Mecanismo do *feeder* (adaptado de [1][15]); 1 – Braço de suporte do punção; 2 – Punção; 3 – Camisa; 4 – Bacia; 5 – Batente da bacia; 6 – Orifício; 7 – Cobertura.

O *feeder* é essencialmente constituído pelo motor elétrico, bacia, camisa, punções, orifício e tesouras. O vidro, vindo dos canais, escorre para o interior da bacia refratária. Na sua parte inferior está o orifício refratário. Este orifício possui um número de furos que, geralmente, está compreendido entre 1 e 4, determinando assim se o processo é em gota simples, dupla, tripla ou quádrupla, respetivamente. Centrados com os furos do orifício encontram-se os punções. Estes, acionados por intermédio de um motor elétrico, efetuam solidariamente o movimento de descida e subida de maneira a forçar a saída do vidro do interior da bacia na forma de fio. Este movimento é tanto mais rápido quanto a cadência de produção. A camisa refratária é, essencialmente um tubo, cuja principal função é o controlo da quantidade de vidro que sai pelo orifício. Subindo a camisa em relação ao batente da bacia promove-se o aumento do fluxo de vidro. A descida da camisa produz o efeito contrário. Por fim, imediatamente abaixo do orifício encontram-se as tesouras que cortam os fios de vidro na forma de gotas, com tamanho e peso controlados, conforme esquematizado na Figura 2.6 [1].

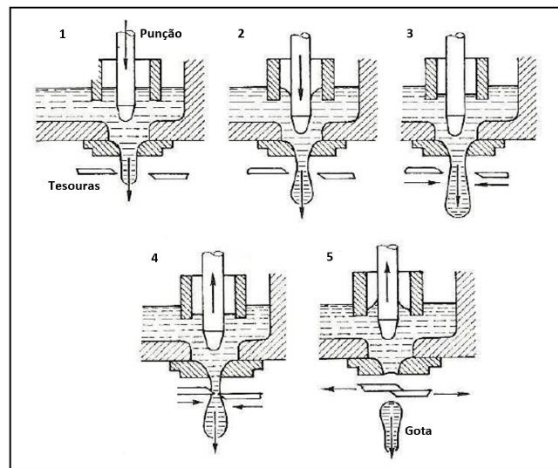


Figura 2.6. Formação da gota pelas tesouras (adaptado de [1]); 1 e 2 – Descida do punção; 3 – Fim do curso do punção; 4 – Início da subida do punção (que cria um efeito de sucção) e do corte pelas tesouras; 5 – Fim do corte pelas tesouras e continuação da subida do punção.

As gotas de vidro são formadas com o peso do produto final. O controle da forma é efetuado pelo curso e sucção exercidos pelo punção, bem como pela velocidade de corte das tesouras. A forma e qualidade da gota afeta as restantes etapas do processo. Deste modo, a formação das gotas de vidro pode ser considerada como a primeira do processo de moldação.

2.3. Etapa de moldação

Antes de descrever a etapa de moldação em vidro de embalagem, apresenta-se a Figura 2.7 com a nomenclatura utilizada na descrição de uma embalagem de vidro [16].

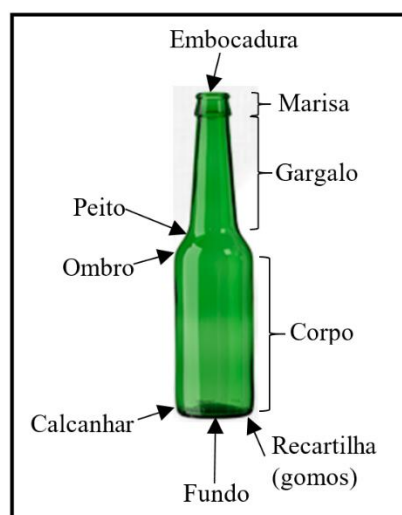


Figura 2.7. Nomenclatura de uma garrafa de vidro (adaptado de [16]).

A etapa de moldação é efetuada em máquinas complexas denominadas máquinas *Individual Section* (IS). As IS são, como o próprio nome indica, máquinas constituídas por secções individuais dispostas lado a lado. O número de secções individuais está, geralmente, compreendido entre 6 e 12. A elevada flexibilidade destas máquinas caracteriza-se pela possibilidade de poder intervir numa secção sem ser necessário interromper o processo totalmente, ou seja, parar as restantes secções. Por outro lado, é possível alterar o processo e as características de fabrico (número de gotas, dimensão das garrafas a produzir, etc.) em poucas horas. Na Figura 2.8 apresenta-se uma máquina IS da Bucher Emhart Glass.

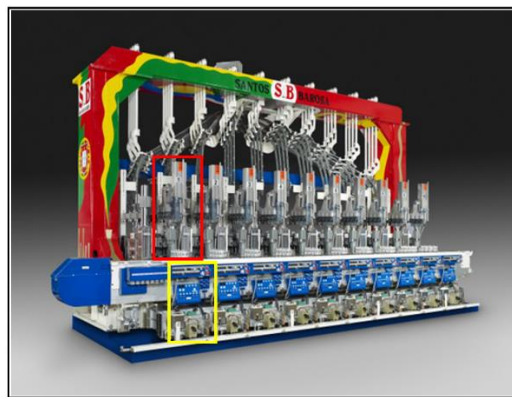


Figura 2.8. Máquina *Individual Section* da Bucher Emhart Glass (adaptado de [17]); Caixa a vermelho – Secção individual; Caixa a amarelo – Controlos da secção (do lado de acabar).

Em cada secção são produzidas, simultaneamente, o número de garrafas correspondente ao número de cavidades existente nessa secção, que corresponde ao número de gotas formadas no mecanismo do *feeder*. Deste modo, e como exemplo, uma máquina IS com 10 secções e a funcionar em gota quádrupla, possui 40 cavidades, produzindo 4 garrafas em cada secção, num total de 40 garrafas por unidade de tempo em toda a máquina.

A Figura 2.9 apresenta os principais componentes e fases da moldação em vidro de embalagem. A descrição da figura será feita no parágrafo seguinte.

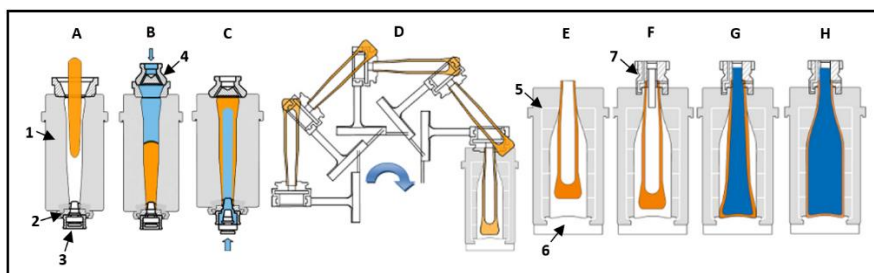


Figura 2.9. Moldação do vidro de embalagem (adaptado de [18]); 1 – Molde de começar ou contra-molde; 2 – Molde de marisa; 3 – Bico; 4 – Tampão; 5 – Molde de acabar; 6 – Fundo; 7 – Cabeça de sopro.

Cada secção possui o lado de começar e o lado de acabar. Cada lado possui os mecanismos e ferramentas moldantes característicos. As gotas de vidro, formadas no *feeder*, descem por efeito da gravidade e guiadas por calhas caem nos moldes de começar, ou contra-moldes. Imediatamente antes da gota cair no contra-molde, este fecha e o bico sobe (Fase A). Quando a gota de vidro está no contra-molde, o tampão desce e a sua válvula abre permitindo a entrada de ar comprimido que empurra o vidro, comprimindo-o no molde de marisa e na parte inferior do contra-molde. A partir deste momento a marisa e a embocadura ficam moldadas (Fase B). De seguida, numa fração de tempo muito curta, o tampão sobe de maneira a libertar o ar que ficou retido entre si e a linha de vidro e desce novamente, selando o contra-molde. O bico desce ligeiramente e insufla o vidro, enconstando-o totalmente ao contra-molde e ao tampão, criando uma depressão na massa vítrea. O esboço da garrafa fica assim terminado (Fase C). O contra-molde abre e o bico desce totalmente. O esboço, agarrado pelo molde de marisa, é invertido pelo mecanismo de inversão (*invert*) para o lado de acabar (Fase D). No lado de acabar, enquanto o *invert* posiciona o esboço, o molde de acabar fecha para o receber (Fase E). Quando o molde fecha totalmente, o mecanismo do *invert* volta ao lado de começar e outra gota cai no contra-molde, iniciando-se um novo ciclo de moldação. Enquanto isso, no lado de acabar, o esboço tem uma pequena fase conhecida por reaquecimento e que se caracteriza pelo seu alongamento (Fase F). O nome de reaquecimento provém do facto de que o vidro na face interior do esboço se encontra a uma temperatura bastante superior ao vidro da sua face exterior. Deste modo, numa fração de tempo bastante estreita, ocorre a condução de calor do interior para o exterior do esboço. Como as temperaturas são ainda bastante elevadas, o grau de viscosidade permite que o vidro deforme e alongue, ocorrendo uma melhor distribuição de temperaturas. A maneira como este alongamento ocorre não é visível pois o molde já se encontra fechado. Entretanto, a cabeça de sopro desce e insufla o esboço contra a face moldante, originando assim a forma final da garrafa (Fases G e H). O molde abre e as pinças de extração retiram a garrafa para o exterior, pousando-as numa placa com ventilação vertical. Durante esta fase, a temperatura em toda a espessura da garrafa fica muito perto da homogeneização, podendo ser empurrada para o tapete da máquina que a encaminhará até à arca de recozimento.

A descrição apresentada corresponde ao processo soprado-soprado, nome técnico derivado da utilização de duplo sopro (nas fases de moldação do esboço e da forma final). Este processo permite a conformação de uma grande variedade de modelos de

garrafas. Pode produzir garrafas de cerveja (20, 25, 33 e 100 cl), garrafas de vinho (Borgonha, Bordaleza, Porto, etc.), entre outras de embocadura estreita a intermédia. Embora neste documento não sejam descritos, existem também os processos prensado-soprado (indicado para garrafas de embocadura larga) e o prensado-soprado de gargalo estreito (à semelhança do soprado-soprado é indicado para garrafas de embocadura estreita). A diferença destes dois últimos processos relativamente ao processo soprado-soprado reside, essencialmente, na utilização de um punção (em vez de sopro) durante a fase de elaboração do esboço no lado de começar.

A fase de conformação do esboço no lado de começar é essencial na definição de uma correta distribuição do vidro na garrafa final. Naturalmente, e dadas as características de um sopro de ar comprimido, é impossível garantir que se exerça uma perfeita pressão sobre todos os pontos do vidro, de maneira a que este expanda uniformemente. Posteriormente, no lado de acabar, o sopro final força o vidro, já com a depressão característica do esboço, a encostar às faces do molde de acabar. A imperfeição na distribuição de vidro, em conjugação com as diferenças térmicas e de viscosidade, fazem com que o vidro estire de forma diferenciada e, portanto, que produto final não apresente uma distribuição uniforme de vidro. Atualmente, ao nível do projeto dos contra-moldes e em curso de produção, são adotadas otimizações e estratégias, respetivamente, no sentido de contornar esta situação.

A presente Dissertação centra o estudo na fase de moldação da garrafa na sua fase final, ou seja, no lado de acabar. Nesta fase tem de ocorrer uma rápida extração de calor no sentido de conferir ao vidro a sua forma final, independentemente da temperatura apresentada pelo esboço quando este entra em contacto com as faces do molde de acabar. Deste modo, esta é a etapa mais importante quando se pretendem aumentar cadências de produção. Com efeito, os moldes de acabar, auxiliados pela ventilação que neles ocorre, têm de extrair ao vidro o calor necessário para que a garrafa apresente, no momento de abertura do molde, uma temperatura que permita a sua correta extração, sem que ocorram deformações. Todas as secções têm de estar corretamente temporizadas e numa compatibilidade tal, por forma a que esta premissa se verifique em toda a máquina. A cadência de produção é, no entanto, condicionada a montante, pelas limitações de extração de vidro do forno, mas também pelas limitações ao nível da tecnologia instalada, quer ao nível das máquinas IS e respetivos mecanismos, quer, como já referido, ao nível das

ferramentas moldantes. Trata-se, portanto, de uma compatibilidade complexa e que depende de variáveis, muitas vezes, difíceis de controlar.

Numa máquina IS todas as secções funcionam ao mesmo tempo, mas com um determinado desfasamento temporal entre si. As secções possuem um conjunto de mecanismos que são atuados por servomotores ou de forma pneumática (por intermédio de ar comprimido). Estes mecanismos realizam movimentos que são temporizados de acordo com a cadência de produção. Tratando-se de um processo técnico e complexo, não há literatura que desenvolva com suficiente rigor o processo e as temporizações dos diversos mecanismos. No entanto, no ANEXO B apresenta-se uma representação das temporizações utilizadas numa máquina IS [19]. É possível verificar que cada secção individual possui uma divisão em 360 partes de tempo, denominados “360 Graus de Máquina”, e que todos os movimentos são temporizados nessa unidade. Pode verificar-se também que, em cada secção, enquanto decorrem movimentos no lado de começar (*Blank Side*) estão a decorrer movimentos no lado de acabar (*Blow Side*). A transferência e reaquecimento do esboço (*Transfer and Reheat*) é a etapa intermédia, mediada pelo mecanismo de inversão que transporta o esboço do lado de começar para o lado de acabar. Embora seja apenas uma descrição simples, com uma escala de tempo (em segundos) representativa de uma determinada cadência, esta figura retrata com algum rigor a sequência e duração temporal típicos dos vários movimentos de uma secção numa máquina IS.

Segue-se uma breve apresentação dos parâmetros temporais considerados relevantes para o presente documento:

- Cadência da máquina [gotas/minuto.máquina] – Número de gotas cortadas por minuto que alimentam toda a máquina;
- Cadência de secção [gotas/minuto.secção] – Número de gotas recebidas por secção por minuto, ou seja, cadência da máquina dividida pelo número de secções;
- Cadência por cavidade [gotas/minuto.cavidade] – Número de gotas recebidas por cavidade por minuto, ou seja, cadência da secção dividida pelo número de cavidades na secção (1, 2, 3 ou 4);
- Tempo de ciclo de máquina [s] – Na mesma secção, enquanto está a ser moldado um esboço no lado de começar, está também a ser moldado um produto final no lado de acabar. Deste modo, as moldações são

simultâneas, correspondendo este tempo de ciclo à duração de cada uma delas individualmente. Corresponde, portanto, à duração de metade da moldação total de uma garrafa;

- Tempo de ciclo de garrafa [s] – Duração da moldação total de uma garrafa. Corresponde ao dobro do tempo de ciclo de máquina;
- Duração do “Grau de Máquina” [s/°] – Unidade básica de temporização do processo. Corresponde à duração, em segundos, de cada grau de máquina. Obtém-se dividindo o tempo de ciclo de máquina por 360.

Como se depreende, a duração em segundos de um determinado movimento, obtém-se multiplicando o número de graus que dura esse movimento pelo valor do “Grau de Máquina”.

Quando o operador pretende alterar a temporização de um determinado movimento, altera a duração em graus desse movimento, logo, a sua correspondência em segundos. As durações do “Grau de Máquina” podem variar entre cerca de 0,03 segundos a 0,01 segundos dependendo das cadências de produção. Esta descrição fornece uma medida da liberdade de operação numa máquina IS. De facto, a manipulação à centésima de segundo é motivada pela enorme variação de temperatura e viscosidade que ocorre no vidro durante a fase de moldação e, inerentemente, da necessidade em controlar essas variações para a formação de garrafas que preencham os requisitos de qualidade.

2.4. Ferramentas moldantes

Conforme já abordado, existem ferramentas de moldação no lado de começar e no lado de acabar.

A Figura 2.10 representa um molde de marisa. Constituído por duas metades e pelo anel, é responsável pela formação da marisa da garrafa e pode ter várias formas de acordo com o método de selagem do produto final (tampa coroa, tampa de rosca, etc.). Este molde está fixo no porta-marisas e através do mecanismo de inversão transporta o esboço da garrafa do lado de começar para o lado de acabar.



Figura 2.10. Molde de marisa [20].

A Figura 2.11 apresenta o contra-molde ou molde de começar. É um molde simples, constituído por duas metades e pelo tampão que inclui a válvula por onde sai o ar responsável pelo encosto do vidro e moldação da marisa. Apesar da sua simplicidade, o seu perfil é estudado por forma a que a entrada da gota seja suave e que o esboço em si formado apresente a melhor distribuição de vidro possível. Estes moldes possuem furos verticais por onde passa o ar de arrefecimento.



Figura 2.11. Molde de começar ou contra-molde [21]; 1 – Duas metades (macho e fêmea); 2 – Tampão; 3 – Válvula do tampão; 4 – Furos para passagem do ar de arrefecimento.

Na Figura 2.12 apresenta-se o conjunto do molde de acabar. Este molde apresenta o perfil final do produto. É constituído por duas metades e pelo fundo. À semelhança do molde de começar, possui furos verticais (através do fundo e do molde) que possibilitam o arrefecimento do conjunto. O seu nome, sistema *Vertiflow*, deriva do escoamento de ar se processar no sentido da verticalidade da garrafa, ou seja, de baixo para cima. Conforme se pode ver, dada a forma de encaixe, este arrefecimento só é ligado quando o molde está completamente fechado, ou seja, quando há concordância entre os furos do

Depreende-se portanto que, a par das melhores propriedades termofísicas e mecânicas do bronze-alumínio, se encontra um custo económico bastante superior na sua aquisição e reparação. Estas desvantagens fazem com que as empresas produtoras de embalagens de vidro ponderem a sua aquisição, mediante outros fatores. Por exemplo, se o artigo é propositadamente para produzir a baixas cadências, por se tratar de uma garrafa pesada e de grandes dimensões ou se, por outro lado, o forno de onde vai ser extraído o vidro para a sua produção tem limitações de tiragem, então a aquisição destes moldes poderá não ser rentável economicamente.

A Tabela 2.2 apresenta de forma sucinta algumas das propriedades das ligas de ferro fundido e bronze-alumínio habitualmente utilizadas no fabrico dos moldes para vidro de embalagem. Tratam-se de características a 20 °C e a 500 °C.

Tabela 2.2. Típica gama de propriedades dos materiais utilizados no fabrico dos moldes para vidro de embalagem [24].

| Propriedade | Temperatura [°C] | Ferro fundido lamelar | Bronze-alumínio |
|---|-------------------------|------------------------------|------------------------|
| Tensão Limite de Rotura [MPa] | 20 | 200 | 500 |
| Módulo de Elasticidade [GPa] | 500 | 83 | 115 |
| Alongamento [%] | 20 | 1,50 | 0,5 |
| Dureza [HB] | 20 | 145 - 165 | 185 - 200 |
| Coefficiente de expansão térmica [$\mu\text{m.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] | 500 | 14 | 17 |
| Condutibilidade térmica [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] | 20 | 43,3 | 80 |
| Condutibilidade térmica [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] | 500 | 38,1 | 70 - 75 |

2.5. Formas de transmissão de calor

Durante a etapa de moldação coexistem os mecanismos de transmissão de calor por condução, convecção e radiação que se encontram esquematizados na Figura 2.13 [25] [26].

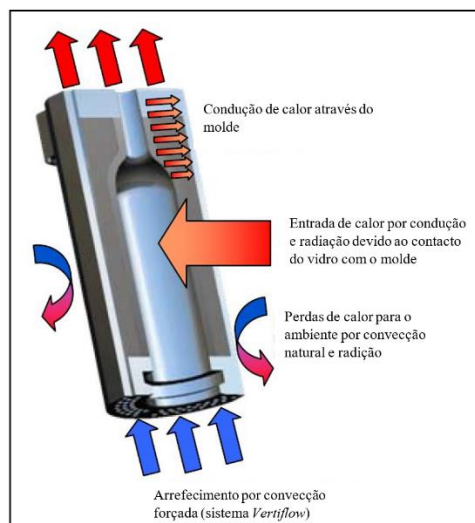


Figura 2.13. Formas de transmissão de calor na moldação de vidro de embalagem (Adaptado de [25]).

2.5.1. Condução

O processo de transmissão de calor por condução ocorre ao longo da espessura do vidro e do molde devido ao contacto entre ambos, sendo governado pela lei de Fourier [25]:

$$\dot{Q} = -K \cdot A_{\perp} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.6)$$

Nesta equação a potência térmica, \dot{Q} (expressa em W), é proporcional à condutibilidade térmica do material, K , à área perpendicular ao fluxo de calor, A_{\perp} e ao gradiente de temperaturas no meio, dT/dx . Verifica-se que o gradiente de temperatura é negativo pois a temperatura decresce com o aumento de x (a condução de calor realiza-se na direção da menor temperatura). Assim, o sinal negativo na equação garante que a transferência de calor na direção positiva de x resulta numa quantidade positiva.

Os gradientes térmicos existentes no vidro e no molde são os responsáveis pelo fluxo de calor que se verifica. O vidro, a uma temperatura superior à existente no molde, quando entra em contacto com este, tende a aquecê-lo. Durante esta fase de contacto, o calor flui sucessivamente a partir das camadas internas da garrafa no sentido da cavidade moldante. Entretanto, o calor propaga-se ao longo do molde para as zonas onde estão os furos de ventilação, local onde as temperaturas são inferiores, sendo então libertado. Pela própria lei de Fourier, este mecanismo evolui no sentido da equalização das temperaturas.

No entanto, em moldação isto não se verifica, pois após alguns segundos de contacto do vidro com a face moldante, ocorre a abertura do molde e um novo contacto, num processo cíclico transiente. Este facto leva a que se atinja um determinado equilíbrio dinâmico de temperaturas após alguns ciclos de moldação [11]. Sabe-se que temperaturas do molde entre 480 °C e 550 °C otimizam os rendimentos de produção. Temperaturas inferiores podem originar os defeitos conhecidos por sedas (fraturas no vidro, na garrafa moldada) enquanto que temperaturas superiores a 650 °C originam a adesão do vidro ao metal [27].

A transmissão de calor por condução é preponderante neste processo [26]. Dado que as propriedades do vidro podem não ser suficientemente alteráveis pois obedecem a outros constrangimentos, torna-se necessário utilizar moldes fabricados em materiais com melhor condutibilidade térmica, principalmente a elevadas temperaturas, por forma a aumentar a taxa de transferência de calor.

2.5.1.1. Difusividade térmica

A difusividade térmica, α (expressa em $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), é uma propriedade muito importante em análises de condução de calor em regime transiente. O seu valor é uma medida de quão rápida é a difusão térmica através de um meio e é definida por [6][28]:

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad (2.7)$$

tratando-se portanto do quociente entre o valor de condutibilidade térmica do material, K , que representa a capacidade de transmitir calor e o valor da sua capacidade térmica $\rho \cdot C_p$, que representa a capacidade que esse material possui em armazená-lo por unidade de volume. Conclui-se que quanto maior a condutibilidade térmica e menor a capacidade térmica, mais rápida é a resposta às diferenças térmicas pois mais rápida é a condução de calor através do meio.

2.5.1.2. Resistência térmica e lubrificação

A resistência térmica de contacto, R_c (expressa em $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) é o inverso da condutância térmica de contacto. Pode ser obtida através do quociente entre a diferença de temperaturas numa interface, ΔT_{int} e o valor de potência térmica efetivamente transferida

nessa interface por unidade de área, \dot{Q}/A . O seu valor determina-se pela seguinte equação [28]:

$$R_c = \frac{\Delta T_{int}}{\dot{Q}/A} \quad (2.8)$$

Na indústria de vidro de embalagem, em intervalos de tempo de 20 a 30 minutos, dependendo da perceção e sensibilidade do operador, é necessário lubrificar os moldes por intermédio de um escovilhão embebido em óleo lubrificante. Esta lubrificação é efetuada essencialmente nos moldes de começar, mas também em algumas zonas do molde de acabar, nomeadamente fundo, peito e topo. Em primeira instância, serve para arrefecer a face do molde que tende a aquecer ao longo dos ciclos de moldação. Em segundo lugar, serve para facilitar a desmoldação da garrafa, minimizando a possibilidade de ocorrer aderência do vidro à face moldante e de dificuldades mecânicas na abertura e fecho do molde [29].

Na indústria vidreira utilizam-se lubrificantes essencialmente consituídos por óleo derivado de petróleo, grafite e enxofre, entre outros aditivos (ANEXO D) [30]. O lubrificante, ao ser transportado na superfície do esboço (vindo do molde de começar), em conjugação com o que é aplicado diretamente no molde de acabar, potencia a resistência térmica. Com efeito, a camada de lubrificante que se deposita na superfície moldante, bem como os gases provenientes da sua combustão, diminuem a condutância de contacto. Este parâmetro é função da pressão na interface, da temperatura do vidro (e sua viscosidade) e da rugosidade da face moldante. Como exemplo, quanto maior a temperatura do vidro, menor a sua viscosidade, logo mais efetivo é o contacto entre vidro e molde, já que o vidro preenche melhor as micro cavidades da face moldante. Por outro lado, durante o contacto, à medida que o vidro arrefece e a viscosidade sobe, a moldação contrai e, eventualmente, a determinada altura deixa de estar em contacto efetivo com o molde [31].

Na bibliografia é possível encontrar equações para a determinação da condutância de contacto, que entram linha de conta com a distância de separação entre o vidro e o molde, a diferença de temperaturas entre ambos e a condutibilidade dos gases de separação. No entanto, é admitido que atualmente não há forma de prever estes valores convenientemente, considerando esta como sendo a condição de fronteira crítica para problemas de simulação numérica deste tipo [32].

Alguns autores referem valores de condutância de contacto de $5000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ e $7000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ [31][33]. No entanto, outros estudos parecem indicar uma determinada dependência deste coeficiente em função do tempo de contacto e para diferentes condições de pressão. Apesar das diferenças, constata-se coeficientes acima dos $6000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ durante primeiras décimas de segundo, decrescendo rapidamente e atingindo valores ligeiramente acima dos $2000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ao fim de 3 a 4 segundos de contacto [34][35].

Deste modo, se conclui que não há concordância em relação a estes valores, dependendo muito do estado dos moldes, do método de lubrificação e temporalmente entre lubrificações.

2.5.2. Convecção

A convecção está presente de duas formas: Convecção natural e convecção forçada, sendo governada pela lei de arrefecimento de Newton [25]:

$$\dot{Q} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.9)$$

onde \dot{Q} , é a potência térmica transferida (expressa em W) e é proporcional ao valor do coeficiente de transmissão de calor por convecção, h , à área de superfície de transferência de calor, A_s e à diferença de temperaturas entre ambos, $(T_s - T_\infty)$.

A convecção natural ocorre de forma permanente no exterior do molde e momentaneamente no seu interior durante a abertura e fecho, momento em que é extraída uma garrafa e entra um novo esboço. Devido ao curto tempo em que o molde está aberto, bem como ao baixo coeficiente de transmissão de calor associado, verifica-se que o arrefecimento provocado por convecção natural é praticamente desprezável. De resto, na presente Dissertação aborda-se a simulação relativa ao momento da moldação. Deste modo, não mais se entrará em linha de conta com a convecção natural.

A convecção forçada ocorre quando o molde está fechado e atua nos canais de arrefecimento do molde (sistema *VertiFlow*), caracterizados pela sua forma circular e em grande número de maneira a incrementar a área de permuta térmica. Este sistema é determinante para a manutenção de uma correta temperatura do molde. O ar é produzido em potentes ventiladores, conduzido através de condutas existentes ao nível inferior da máquina IS e encaminhado pelo mecanismo dos fundos, atuando sob o conjunto de moldes situado nas cavidades de cada secção.

Dadas as elevadas temperaturas e à numerosa coleção de moldes (pode chegar a mais de 40 moldes no lado de acabar e outros tantos no lado de começar), são necessários elevados caudais de ar. Desta forma, as velocidades existentes nos furos de arrefecimento tornam-se uma incógnita e a sua correta medição é de extrema dificuldade, principalmente devido aos poucos segundos em que o sistema está em funcionamento durante um ciclo de moldação. São expectáveis velocidades na ordem dos 75 a 125 m.s⁻¹ [25]. No entanto, como cada empresa produtora de vidro de embalagem possui os seus próprios sistemas de ventilação, com diferentes regulações e características, estes valores podem variar de forma significativa. Como os regimes de escoamento são expressivos, são expectáveis elevados coeficientes de transmissão de calor por convecção e números de Reynolds. Para condutas de secção circular, semelhantes aos canais de arrefecimento do molde, a equação do número de Reynolds é descrita por [6]:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (2.10)$$

onde ρ é a massa volúmica do fluido, v a sua velocidade média e d o diâmetro interno do canal. No denominador, μ representa a viscosidade dinâmica do fluido. Esta relação adimensional trata, portanto, da relação entre as forças de inércia e as forças de viscosidade existentes num determinado escoamento.

Para baixos valores de Reynolds, geralmente caracterizados por baixas velocidades, o escoamento do fluido é constituído por linhas de corrente suaves e orientadas, ou seja, o regime de escoamento é laminar. No entanto, quando na presença de flutuações de velocidade e de movimento descoordenado do fluido, quando as forças de inércia são substancialmente superiores às de viscosidade, o regime é considerado turbulento. A transição entre regimes não ocorre de forma brusca, mas sim num determinado intervalo onde coexistem os dois regimes, até o escoamento se tornar turbulento completamente desenvolvido. Em escoamento interno de fluidos os regimes são diferenciados da seguinte forma [28]:

- Regime laminar: $Re < 2300$
- Transição: $2300 \leq Re \leq 10000$
- Regime turbulento: $Re > 10000$

O conhecimento dos coeficientes de transmissão de calor e dos números de Reynolds existentes nos canais de arrefecimento do molde pode fornecer interessantes indicações ao nível de projeto, permitindo um melhor dimensionamento da furação e, por outro lado, uma correta regulação dos ventiladores no sentido da sua maior eficiência.

2.5.3. Radiação

O processo de transmissão de calor por radiação assume especial importância no momento em que o esboço entra no molde de acabar e se mantém a estirar, etapa já mencionada e conhecida por reaquecimento. Nesta etapa, a potência térmica, \dot{Q} (expressa em W) resultante das trocas de calor entre a superfície do vidro, a superfície da face moldante e a vizinhança são efetuadas por radiação em virtude das suas diferentes temperaturas, T , valores de emissividade, ε e correspondentes áreas superficiais, A_s , sendo governadas pela equação seguinte [26]:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot A_s \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (2.11)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

Após o fecho do molde e o sopro final começar a atuar, o vidro encosta rapidamente ao molde e as trocas por radiação deixam de ter preponderância, predominando a transmissão de calor por condução. Estudos baseados em análise computacional, indicam que a contribuição da radiação na transmissão total de calor durante o contacto do vidro com o molde é desprezável [36].

O presente trabalho incide precisamente sobre a fase de contacto, deste modo, não se alongará a descrição das trocas de calor por radiação por se entender que a sua influência, para além de difícil quantificação, não se considera de extrema importância para o estudo.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Caracterização da embalagem em estudo

A embalagem utilizada para o presente estudo de simulação numérica é uma garrafa para 1 litro de cerveja. Apesar da análise ser efetuada apenas para este modelo, considera-se que os resultados podem ser extrapolados para os restantes modelos de litro de cerveja, visto as geometrias e características das garrafas e respetivos moldes serem muito semelhantes. A Figura 3.1 apresenta a referida garrafa.



Figura 3.1. Modelo de embalagem utilizada na simulação numérica – Garrafa para 1 litro de cerveja [37].

Este modelo é moldado com uma duração de arrefecimento e de contacto do vidro com a face moldante durante 3 segundos. A duração do “Grau de Máquina” é de 0,02 segundos. Tratando-se da temporização utilizada no controlo do processo, este será o intervalo temporal para apresentação de resultados por parte do Ansys® CFX. Deste modo, e se pretendido, é possível analisarem-se resultados para menores tempos de moldação e arrefecimento, predizendo assim os valores de interesse. A Tabela 3.2 resume as principais características da garrafa, ao nível físico e de parâmetros de máquina e que foram utilizados na simulação numérica.

Tabela 3.1. Características físicas e parâmetros de máquina relativos à moldação da garrafa em estudo.

| | |
|--|--------------------|
| Tipo de embalagem | Garrafa de 1 litro |
| Processo | Gota Dupla |
| Espessura de vidro no corpo [mm] | 2,5 |
| Espessura de vidro no fundo [mm] | 5 |
| Duração do “Grau de Máquina” [s/°] | 0,02 |
| Duração da moldação em “Graus de Máquina” [°] | 150 |
| Duração do arrefecimento [s] | 3 |
| Duração do contacto vidro-molde [s] | 3 |

3.2. Termografia e gamas de temperatura

Para efetuar a simulação numérica da moldação em vidro de embalagem é de crucial importância possuir um conhecimento dos perfis e gamas de temperatura existentes no molde e no vidro, em particular na face moldante e na face exterior da garrafa. As referências são escassas, no entanto, na Figura 3.2 é possível conferir os valores aproximados de temperatura durante a fase de moldação no lado de começar e no lado de acabar, tanto ao nível do vidro como do molde [38]. Trata-se verdadeiramente de uma imagem com grande conteúdo informativo.

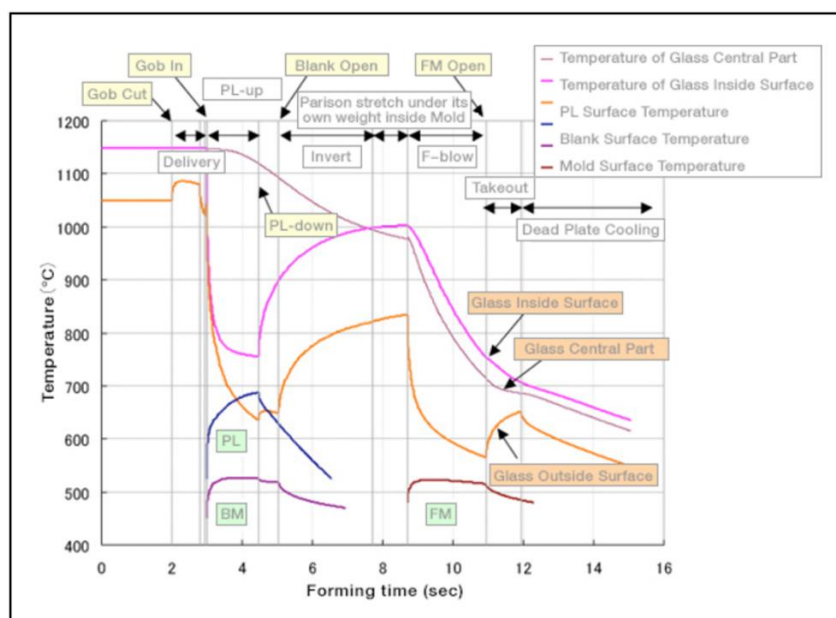


Figura 3.2. Perfis de temperatura nos moldes e no vidro durante a moldação de uma embalagem de vidro [38].

Centremo-nos particularmente nas fases que influem na moldação no lado de acabar (*Invert, Parison stretch under its own weight inside Mold e F-blow*): O esboço, vindo do lado de começar, faz a inversão e chega ao molde de acabar onde fica a estirar até ao fecho deste. Durante esta fase, o exterior do esboço sofre um apreciável aumento de temperatura, aumentando desde 650 °C aquando da abertura do molde de começar, até aproximadamente 840 °C, momento de encosto do vidro no molde de acabar. No momento em que esse contacto ocorre, a superfície do molde de acabar é de sensivelmente 500 °C, mas eleva-se até cerca de 520 °C durante a transferência térmica. Por sua vez, a temperatura superficial do vidro desce até cerca de 560 °C, momento no qual ocorre a extração da garrafa. Não é apresentada informação sobre que tipo de garrafa e material do molde incide esta figura, nem tão pouco a composição do vidro. No entanto é uma boa referência em termos indicativos já que não é expectável que as diferenças sejam muito acentuadas relativamente a outras condições [38].

Depreende-se, portanto, que as temperaturas reais do vidro durante a moldação, podem diferir em relação às que são indicadas pelas curvas de viscosidade. De maneira a possuir uma informação mais realista, foram obtidas imagens por intermédio de infravermelhos na fase de moldação no lado de acabar. Deste modo, recolheram-se os valores de temperatura a serem utilizados como condições iniciais na simulação numérica.

As imagens foram recolhidas em curso de produção. Os moldes eram de bronze-alumínio com alguns dias em funcionamento permanente. Desta forma, as temperaturas apresentadas são também indicativas de um regime estável de produção. Para o molde foi utilizada uma emissividade de 0,85, enquanto que para o vidro foi utilizado o valor de 0,95. Estes valores de emissividade são prática comum na indústria vidreira e são obviamente, consistentes cientificamente. A Tabela 3.2 apresenta os parâmetros de afinação utilizados na obtenção das termografias [39].

Tabela 3.2. Parâmetros de ajuste da câmara para a obtenção das termografias por infravermelhos [39].

| Parâmetro de ajuste | Vidro | Molde |
|--|--------------|--------------|
| Emissividade, ϵ | 0,95 | 0,85 |
| Temperatura refletida [°C] | 480 | 480 |
| Temperatura ambiente [°C] | 30 | 30 |
| Humidade do ar [%] | 50 | 50 |

A Figura 3.3 refere-se às temperaturas do esboço de vidro na sua chegada ao molde de acabar. Verifica-se que a máxima temperatura está situada perto do fundo do esboço e atinge perto de 760 °C. No entanto, como já referido, até ocorrer o contacto efetivo do vidro à face moldante, estima-se que a temperatura máxima suba até perto de 850 °C.



Figura 3.3. Termografia por infravermelhos ao esboço de vidro.

A Figura 3.4 apresenta as imagens por infravermelhos referentes aos dois moldes da mesma secção, na zona de moldação. Verifica-se que as temperaturas são semelhantes e que os valores máximos são de 476 °C e 474 °C.

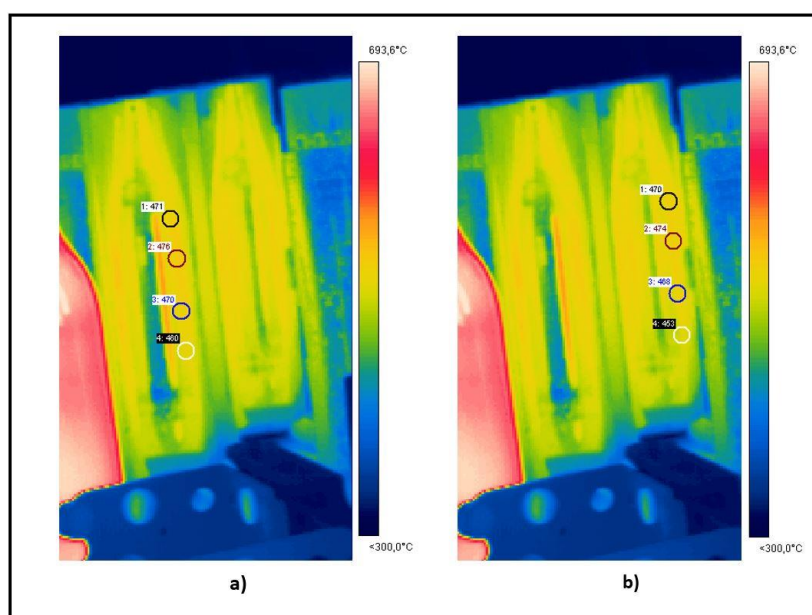


Figura 3.4. Termografias à face dos moldes de acabar; a) Cavidade de fora; b) Cavidade de dentro.

A imagem termográfica da Figura 3.5 ilustra as temperaturas existentes à superfície do vidro imediatamente após a abertura do molde. Em primeiro lugar, constata-se uma certa homogeneidade de temperaturas, indicativa de um correto arrefecimento da moldação, sem excessivos gradientes térmicos. Por outro lado, confirma-se que a temperatura ideal do vidro para abertura do molde se situa em volta dos 600 °C, substancialmente inferior ao que é geralmente indicado pelas curvas de viscosidade.

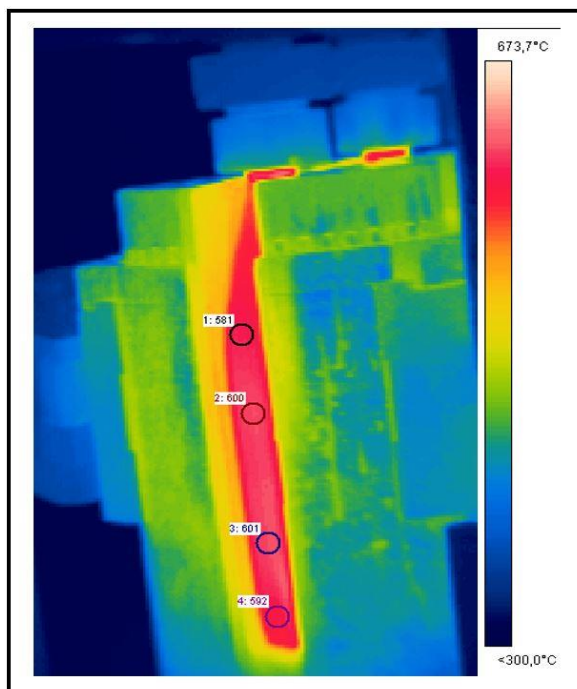


Figura 3.5. Termografia por infravermelhos à garrafa moldada, no momento de abertura do molde.

Como resultado da análise por infravermelhos, apresenta-se a Tabela 3.3, que resume as temperaturas iniciais impostas ao molde e ao vidro na simulação numérica.

Tabela 3.3. Temperaturas iniciais do molde e do vidro.

| Domínio de simulação | Temperatura [°C] |
|------------------------|------------------|
| Molde | 480 |
| Vidro (Garrafa) | 850 |

3.3. Caudal do ar de arrefecimento

Como já abordado, o arrefecimento dos moldes é efetuado por intermédio de elevados caudais de ar. No presente trabalho pretende-se simular de forma realista este

processo. Deste modo, utilizou-se o valor de caudal mássico como condição de fronteira na entrada do ar de arrefecimento ao molde, por se entender ser esse o valor de mais fácil obtenção e menores erros inerentes à sua recolha e utilização.

O ar para o arrefecimento dos moldes é produzido em ventiladores existentes ao nível subterrâneo. É utilizado um ventilador para os moldes do lado de começar e outro ventilador para os moldes do lado de acabar. Dado o objetivo do presente estudo, centremo-nos no ventilador do lado de acabar: O ar nele produzido segue por intermédio de uma tubagem localizada por baixo da máquina IS. A tubagem possui picagens alinhadas com as várias secções da máquina IS, permitindo que o ar verticalize até aos fundos dos moldes. Quando a temporização de cada secção assim o indica, a válvula dessa secção é acionada possibilitando a ventilação dos moldes. No fim da temporização dessa secção, a válvula fecha e corta o ar, até ao próximo ciclo. Em curso de produção, toda a máquina IS está em funcionamento, com sensivelmente 3 secções simultâneas em ventilação no lado de acabar. Deste modo, o caudal produzido pelo ventilador é aproximadamente constante. O valor de regulação do ventilador é o da pressão estática que é medida numa tomada existente imediatamente à saída do ventilador. Essa leitura é utilizada pelo variador eletrónico de velocidade que age por forma a que esse valor de pressão estática se mantenha sensivelmente constante.

Para a determinação do valor de caudal de arrefecimento, foram utilizadas as leituras da potência instantânea e da velocidade de rotação do ventilador. As leituras foram obtidas no monitor do variador eletrónico de velocidade e na mesma altura da recolha das imagens de infravermelhos e dos parâmetros de máquina. A Tabela 3.4 resume sucintamente as leituras de interesse.

Tabela 3.4. Parâmetros de funcionamento do ventilador.

| Parâmetro do ventilador | Valor |
|--------------------------------|--------------|
| Potência do motor [kW] | 200 |
| Pressão estática [Pa] | 13000 |
| Potência instantânea [kW] | 45 |
| Velocidade de rotação [rpm] | 2500 |

A Figura 3.6 refere-se à curva de funcionamento do ventilador. Verifica-se que às condições apresentadas, o seu funcionamento não estava na zona de maior rendimento. Isto deve-se ao facto dos ventiladores serem geralmente sobredimensionados para alimentarem outra máquina vizinha em caso de avaria do seu ventilador, através de um *bypass* na tubagem.

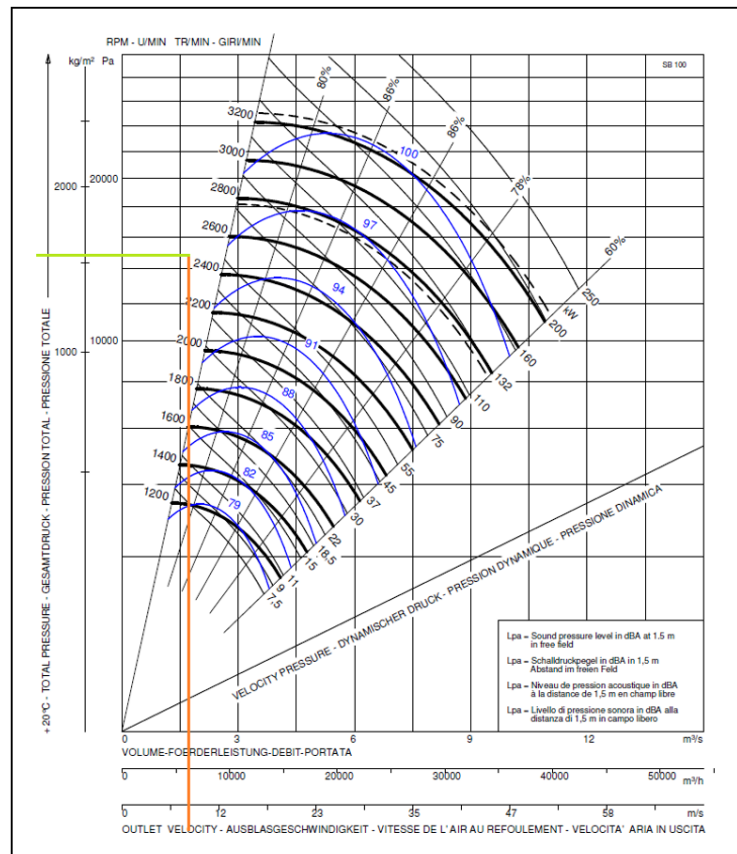


Figura 3.6. Curva de funcionamento do ventilador.

Através da interseção dos valores de potência e velocidade de rotação, obtém-se à saída do ventilador uma pressão total de 14500 Pa e um caudal volúmico de aproximadamente $1,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Como se depreende, este é o valor de caudal que alimenta as secções da máquina. Arbitrando 10% de perdas sobre este valor (para considerar pequenas fugas nas tubagens e nas folgas existentes entre mecanismos), obtém-se um caudal volúmico corrigido de $1,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Este valor deve ser dividido de forma equitativa por 3 devido ao número de secções em funcionamento simultâneo, por 2 respeitante ao número de moldes em cada secção e novamente por 2 referente ao meio molde que se pretende simular numericamente. Desta forma, obtém-se um caudal volúmico de $0,142 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ por meio molde.

Dado que o valor de entrada na simulação é o de caudal mássico, é necessário determiná-lo através da multiplicação do caudal volúmico pela massa volúmica do ar à temperatura considerada. O ar estava a uma temperatura de 30°C, a que corresponde um valor de massa volúmica de 1,165 kg.m⁻³ [40]. Deste modo se conclui que o caudal mássico do ar de arrefecimento era de 0,165 kg.s⁻¹ por meio molde. Este foi o valor considerado para efeitos de simulação. A Tabela 3.5 resume as propriedades de interesse e necessárias como condições iniciais impostas à simulação numérica relativamente ao ar de arrefecimento.

Tabela 3.5. Condições iniciais e de fronteira para o ar de arrefecimento (por meio molde) [40].

| Condições do ar de arrefecimento | Valor |
|--|--------------|
| Temperatura [°C] | 30 |
| Massa volúmica [kg.m ⁻³] | 1,165 |
| Caudal volúmico [m ³ .s ⁻¹] | 0,142 |
| Caudal mássico [kg.m ⁻³] | 0,165 |

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1. Domínios e propriedades

Para a simulação numérica foram utilizados três domínios: molde, garrafa (vidro) e arrefecimento. Geometricamente, tanto a garrafa como o molde são simétricos. Deste modo, por forma a evitar volumes de grandes dimensões e respetivas malhagens, considerou-se apenas metade dos domínios para efeitos de simulação. Esta opção facilita também a visualização da distribuição de temperaturas na face moldante durante a análise de resultados. A Figura 4.1 apresenta a modelação dos três domínios por recurso ao Solidworks®, *software* de desenho assistido por computador, tendo sido posteriormente exportados para o Ansys® CFX por intermédio do módulo DesignModeler.

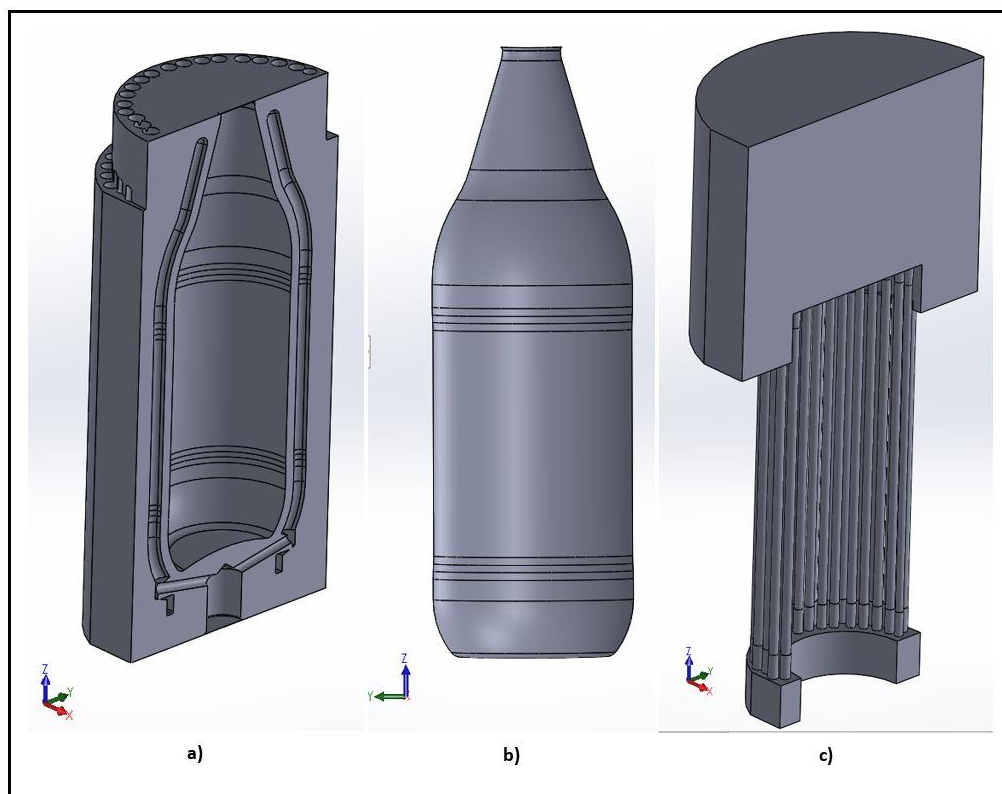


Figura 4.1. Domínios de simulação no Ansys® CFX; a) Molde; b) Garrafa; c) Arrefecimento.

4.1.1. Molde

Na sua maioria, o desenho tridimensional do molde corresponde ao projeto. No entanto, foram efetuadas pequenas simplificações que se consideram insignificantes. Com efeito, foram eliminadas as gravações (pequenas letras, números que identificam o modelo, recartilha, entre outros) e pequenos boleados, pormenores que geralmente são propícios a erros de malhagem e cuja resolução numérica é desnecessária. Procedeu-se também à combinação do fundo com o molde, opção absolutamente plausível de maneira a diminuir a quantidade de domínios de simulação.

Como o material dominante em moldes de acabar é o bronze-alumínio, considera-se este o material para a simulação base. No entanto, tendo por objetivo estudar a diferença entre materiais, foi também efetuada a simulação para moldes em ferro fundido. Deste modo, a Tabela 4.1 e a Tabela 4.2 apresentam as propriedades do bronze-alumínio e do ferro fundido, respetivamente. Para tornar as simulações mais realistas, foram criadas no programa as funções descritivas das variações destas propriedades com a temperatura.

Tabela 4.1. Propriedades termofísicas do bronze-alumínio utilizadas na simulação numérica [11].

| Temperatura [°C] | Condutibilidade térmica [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | Calor específico [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹] | Massa volúmica [kg.m ⁻³] | Difusividade térmica [m ² .s ⁻¹] |
|------------------|---|---|--------------------------------------|---|
| 200 | 58,0 | 376 | 7800 | 1,98E-5 |
| 300 | 66,0 | 418 | 7800 | 2,02E-5 |
| 400 | 73,0 | 585 | 7800 | 1,60E-5 |
| 500 | 78,0 | 752 | 7800 | 1,33E-5 |

Tabela 4.2. Propriedades termofísicas do ferro fundido utilizadas na simulação numérica [11].

| Temperatura [°C] | Condutibilidade térmica [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | Calor específico [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹] | Massa volúmica [kg.m ⁻³] | Difusividade térmica [m ² .s ⁻¹] |
|------------------|---|---|--------------------------------------|---|
| 200 | 40,8 | 569 | 7080 | 1,01E-5 |
| 300 | 39,6 | 616 | 7080 | 9,1E-6 |
| 400 | 38,2 | 662 | 7080 | 8,2E-6 |
| 500 | 36,7 | 713 | 7080 | 6,7E-6 |

Dada a ausência de valores de propriedades para temperaturas mais elevadas, foi solicitado ao programa a manutenção das propriedades para temperaturas superiores. No

entanto, como não se verificam temperaturas muito superiores a 500°C, esta limitação é supérflua.

4.1.2. Garrafa

O modelo tridimensional da garrafa de vidro sofreu as mesmas simplificações descritas para o molde, ou seja, foram eliminados pequenos pormenores como recartilha, letras e números.

Tendo por objetivo simular o processo de moldação convenientemente, considerou-se a garrafa com uma espessura de vidro constante, ou seja, considerou-se a espessura de projeto já referida anteriormente. De resto, dadas as características e variabilidade do processo, em curso de produção nunca se obtém um valor de espessura completamente uniforme, portanto, para uma plausível simulação, assume-se essa possibilidade.

As propriedades do vidro apresentadas na Tabela 4.3 são as existentes em curso de produção, com exceção da condutibilidade térmica que foi obtida nas referências [11].

Tabela 4.3. Propriedades termofísicas do vidro utilizadas na simulação numérica [11].

| Temperatura [°C] | Condutibilidade térmica [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] | Calor específico [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹] | Massa volúmica [kg.m ⁻³] | Difusividade térmica [m ² .s ⁻¹] |
|------------------|---|---|--------------------------------------|---|
| 500 | 2,2 | 1205 | 2461 | 7,419E-7 |
| 600 | 2,2 | 1243 | 2453 | 7,215E-7 |
| 700 | 2,2 | 1272 | 2447 | 7,068E-7 |
| 800 | 2,2 | 1293 | 2440 | 6,973E-7 |
| 900 | 2,2 | 1310 | 2433 | 6,903E-7 |

4.1.3. Arrefecimento

O domínio de arrefecimento corresponde ao volume negativo do molde na zona dos furos, acrescentado de uma porção de volume abaixo e acima deste. Assim, definiu-se a entrada do ar de forma geometricamente semelhante ao real. Por outro lado, a porção superior recria um pouco da atmosfera e permite que a simulação preveja o comportamento do ar na saída dos furos do molde.

Dadas as condições de pressão e temperatura do ar, consideraram-se para efeitos de simulação numérica as propriedades de gás ideal, informações incluídas na base de dados do Ansys® CFX.

O modelo de turbulência utilizado foi o *Shear Stress Transport* (SST). O SST é o modelo recomendado quando se pretendem representações precisas da camada limite, em particular na zona da subcamada laminar onde as forças viscosas são dominantes em relação às forças de inércia. Este modelo de turbulência prediz toda a camada limite com rigor, conseguindo-se assim uma boa representação dos perfis térmicos e de velocidade, tão importantes para este estudo. Para o seu bom funcionamento, tornou-se necessário elaborar uma boa resolução de malha, em particular nas zonas junto às paredes dos furos de arrefecimento, por intermédio de *inflation layers* [41][42].

O parâmetro associado ao escoamento interno de ar nos furos do molde e que também está diretamente relacionado com uma boa resolução de malha e correta escolha do modelo de turbulência é o valor da distância adimensional à parede, y^+ , sendo representado pela equação seguinte:

$$y^+ = \frac{y \cdot u_\tau}{\nu} \quad (4.1)$$

que entra em linha de conta com a velocidade de atrito, u_τ , o valor da distância à parede, y e a viscosidade cinemática do fluido, ν [43].

Da mecânica de fluidos, sabe-se que na vizinhança imediata da parede o desenvolvimento da camada limite se divide em três zonas distintas. A primeira é a subcamada viscosa ($0 < y^+ < 5$) onde o escoamento é laminar, os valores de Reynolds são baixos e a viscosidade é relevante para a transferência de calor e quantidade de movimento. A zona intermédia ($5 < y^+ < 70$) é onde ocorre a transição do regime laminar para o regime turbulento e onde os efeitos da viscosidade molecular e da turbulência possuem importância equiparada. Por fim, a camada exterior turbulenta ($y^+ > 70$) caracteriza-se por ser uma região com elevados valores de Reynolds, predominando a turbulência para o transporte da quantidade de movimento [44].

Computacionalmente, o valor de y^+ está diretamente relacionado com a altura da primeira célula em relação à parede. Para uma boa resolução da subcamada viscosa e dos cálculos de transferência de calor e da quantidade de movimento, é importante conseguir valores de y^+ inferiores a 5, de preferência na ordem de 1 [43].

4.2. Hipóteses de simplificação adotadas

No decorrer do presente texto foram dadas algumas indicações do grau de complexidade e, inerentemente, das simplificações necessárias no estudo numérico do processo de moldação de embalagens de vidro. Nos pontos seguintes apresentam-se sucintamente as principais simplificações adotadas na simulação:

- A moldação é um processo cíclico transiente. Deste modo, para uma mais adequada representação da realidade, seria necessário simular vários ciclos de moldação sucessivos, por forma a que as temperaturas do molde em todo o seu volume atingissem uma distribuição de temperaturas de equilíbrio. No entanto, por simplificação, foi feito apenas o estudo num único ciclo, durante a atuação do sistema de arrefecimento e o contacto do vidro com a face moldante, período em que o molde se encontra fechado. Para tal, foi considerada como temperatura inicial de todo o molde a temperatura máxima observada por intermédio da termografia por infravermelhos;
- Foram desprezadas as etapas que medeiam a fase de contacto e arrefecimento, nomeadamente, abertura e fecho do molde;
- Por motivos já indicados, não foram consideradas as trocas de calor por radiação entre o esboço de vidro e a cavidade do molde;
- Não foi considerada a transmissão de calor por convecção natural na face exterior do molde devido ao baixo coeficiente de convecção associado;
- Foram eliminados os canais de vácuo de menor diâmetro que fazem a ligação do circuito principal do vácuo no molde até à face moldante. Deste modo, despreza-se a atuação exercida pelo vácuo na fase de moldação, por se considerar que o seu efeito em termos térmicos é desprezável. Por outro lado, evita-se a inconveniente malhagem associada ao reduzido diâmetro dos canais;
- Os canais de vácuo principais (de maior diâmetro) foram mantidos por forma a manter o real volume do molde. No entanto, dado que no seu interior ocorre vácuo e, como tal, um reduzido coeficiente de transmissão de calor, decidiu considerar-se o circuito de vácuo como zona adiabática. Deste modo, eliminou-se o volume de ar correspondente, evitando a malhagem associada

e conseguindo-se uma boa aproximação em relação ao seu efeito em termos térmicos;

- Não foi considerado o volume de ar no interior da garrafa, desprezando-se assim o arrefecimento que ocorre ao nível interno decorrente da insuflação. Entende-se que o arrefecimento provocado pelo ar de enchimento, por ser mau condutor térmico, não influencia de forma significativa o perfil de temperaturas da garrafa. Decorrente desta opção, considerou-se a face interior da garrafa como adiabática, evitando-se a malhagem do volume interno.

4.3. Discretização espacial dos domínios

Foram elaboradas 4 análises de maneira a perceber o grau de detalhe necessário na malha final e obter a convergência e independência dos resultados relativos à sua dimensão. As análises foram efetuadas com as mesmas características em termos de condições iniciais e de fronteira, material (bronze-alumínio), parâmetros de análise e de cálculo, sendo que a única diferença foi efetivamente a malha utilizada.

Foram utilizados elementos tetraédricos por forma a assegurar uma melhor resolução de cálculo e qualidade de resultados. Foi também garantida a concordância de malha entre os três domínios [45].

A primeira malha revelou-se muito pouco detalhada, já que foram utilizados, essencialmente, os parâmetros definidos por defeito no *meshing*. Verifica-se, no entanto, que dado o volume em estudo, a malha apresentou desde logo 1126422 nodos, a que correspondem 6515348 elementos.

Por intermédio das funções de afinação de malha e de dimensionamento dos elementos, foram feitas progressões de forma não linear. Este facto é consequência de que, ao tentar-se uma progressão linear no dimensionamento dos elementos, das *inflation layers*, entre outras funções, resulta-se em erros de malha por incompatibilidade de dimensões. Desta forma, as afinações foram elaboradas de forma mais ou menos intuitiva e por tentativa e erro.

Na Figura 4.2 apresentam-se os resultados considerados no estudo de independência de malha. Foram considerados resultados de dois valores de interesse:

temperatura máxima na face do molde; máximo valor do perfil de velocidades do ar de arrefecimento nos furos do molde, num plano transversal situado a 220mm do fundo. Os resultados referem-se ao final da simulação, ou seja, ao fim de 3 segundos.

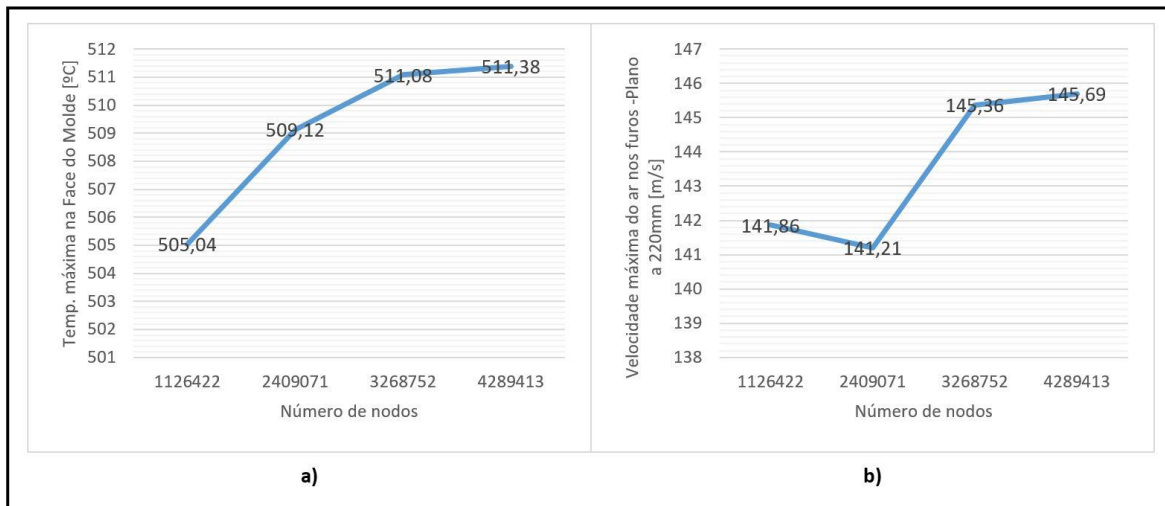


Figura 4.2. Estudo de independência de malha; a) Temperatura máxima na face do molde em função do número de nós; b) Valor máximo do perfil de velocidades do ar nos furos de arrefecimento do molde (num plano a 220mm do fundo) em função do número de nós.

Pode verificar-se que, para ambos os parâmetros, não existe diferença significativa de resultados entre a malha de 3268752 nós e a de 4289413 nós, tendo-se obtido a independência pretendida. Dado que a duração das simulações é função da dimensão da malha e, pretendendo-se otimizar o tempo dispendido, este facto poderia levar a considerar a terceira malha como a adequada. No entanto, verifica-se que no plano considerado, o valor de y^+ no escoamento de ar é de 5,33 na terceira malha e de 2,51 na última. De resto, constata-se que a malha de 4289413 nós apresenta um valor de y^+ desta ordem de grandeza no escoamento do ar ao longo de todos os furos de arrefecimento. O valor ideal seria em volta de 1, no entanto, valores na ordem de 2,5 são suficientemente detalhados na representação da camada limite, permitindo captar com qualidade a região da subcamada laminar. Dada a importância deste parâmetro na definição do escoamento interno, considera-se a malha com 4289413 nós e 13973217 elementos para efeitos de estudo posterior, correspondendo a uma boa discretização espacial dos domínios envolvidos.

A malha foi obtida com as preferências físicas para *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e uma *relevance* de 0, ou seja, uma fineza intermédia. A Tabela 4.4 resume as principais dimensões e características utilizadas na malha final.

Tabela 4.4. Dimensionamento da malha final.

| Parâmetros de dimensionamento da malha final | |
|---|-------------------------|
| Size function | Proximity and Curvature |
| Relevance Center | Medium |
| Initial Size Seed | Active Assembly |
| Smoothing | Medium |
| Transition | Slow |
| Span Angle Center | Fine |
| Curvature Normal Angle [°] | 18 |
| Num Cells Across Gap | 2 |
| Proximity Size Function Sources | Faces |
| Min Size [m] | 1,35E-04 |
| Proximity Min Size [m] | 1,35E-04 |
| Max Face Size [m] | 4,50E-03 |
| Max Tet Size [m] | 9,00E-03 |
| Growth Rate | 1,20 |
| Automatic Mesh Based Defeaturing | On |
| Defeaturing Tolerance [m] | 6,75E-05 |
| Minimum Edge Length [m] | 7,5458E-06 |

Pode considerar-se que se obteve a otimização da malha e que futuramente, em simulações semelhantes, o dimensionamento a utilizar deverá ser idêntico ao apresentado. A Figura 4.3 ilustra a malha global (para os três domínios) obtida por intermédio do dimensionamento final descrito.

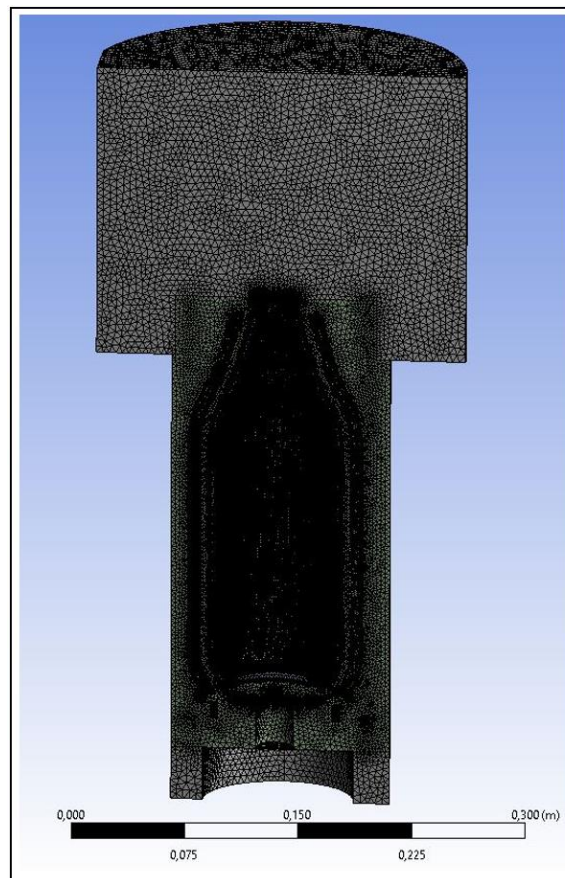


Figura 4.3. Vista geral relativamente à malha final do conjunto.

Como já abordado, foram utilizadas *inflation layers* para as faces de contacto do vidro e do molde, por forma a criar algumas camadas de elementos com dimensão pequena e controlada, captando assim com maior pormenor a transmissão de calor entre os corpos. Foram também criadas *inflation layers* para os furos no molde e, obviamente, no respetivo volume representativo do ar de arrefecimento. Estas camadas foram criadas para captar, respetivamente, a transmissão de calor e a camada limite convenientemente. Por fim, foram utilizadas funções de *face sizing*, *edge sizing* e *vertex sizing* por forma a redimensionar determinadas zonas que, de forma desnecessária, apresentavam a malha excessivamente fina.

Dada a importância das *inflation layers* para a qualidade dos resultados e, para efeitos exemplificativos, apresenta-se a Tabela 4.5 que resume o seu dimensionamento no domínio molde, na face moldante e no domínio arrefecimento, zona interna do escoamento de ar.

Tabela 4.5. Dimensão das *Inflation Layers* relativas à face do molde e ao ar de arrefecimento nos furos.

| Opção | Face Moldante | Ar de arrefecimento (furos) |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Inflation Option | First Layer Thickness | First Layer Thickness |
| First Layer Height [m] | 2E-4 | 1,2E-5 |
| Maximum Layers | 5 | 6 |
| Growth Rate | 1,2 | 1,8 |

A Figura 4.4 apresenta dois pormenores relativos à malhagem e às *inflation layers* onde pode constatar-se o grau de detalhe associado.

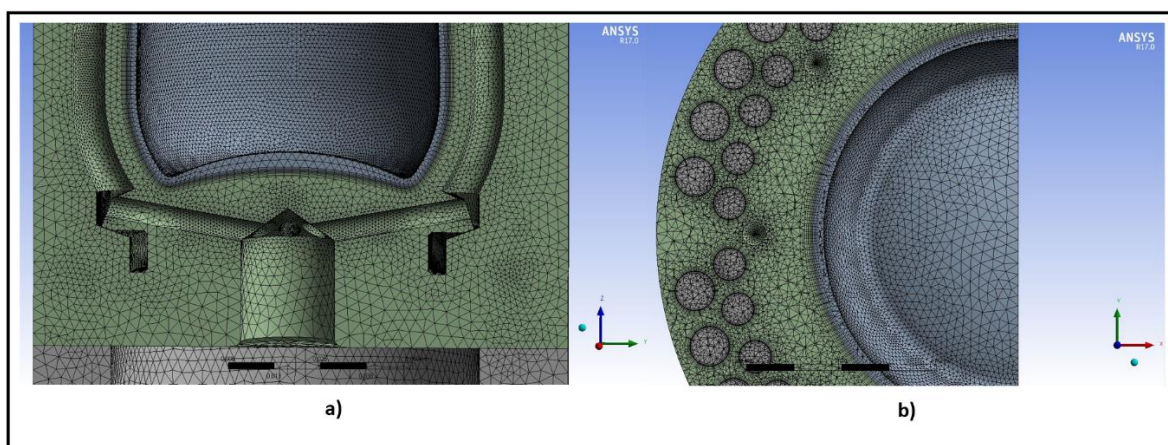


Figura 4.4. Pormenores da malha final; a) Pormenor relativo à dimensão da malha e às zonas de contacto vidro-molde; b) Corte transversal aos canais de arrefecimento e às zonas de contacto vidro-molde.

4.4. Discretização temporal da simulação

Esta descrição baseia-se na análise de resultados tendo por base o nível de resíduos e *imbalance* apresentados pelo CFX – Solver Manager. Sendo os problemas de mecânica dos fluidos e transmissão de calor problemas não lineares, apenas sob condições muito restritivas as equações características de Navier-Stokes podem ser resolvidas analiticamente. Deste modo, o programa de mecânica de fluidos computacional necessita de resolver as equações iterativamente até um ponto onde a solução converge, ou seja, quando os resíduos resultantes dos cálculos associados atingem valores abaixo de um resíduo máximo admitido. Portanto, pode afirmar-se que os resíduos avaliam diretamente os erros das soluções encontradas para uma variável particular e que a solução é tanto mais precisa quanto menores forem esses resíduos [46].

Para simulações semelhantes às do presente estudo, os resíduos mais importantes a minimizar são os relativos às equações de conservação de massa e *momentum* e equações

de conservação de energia, que devem atingir valores na ordem de $1E-5$. Outro parâmetro importante é a obtenção de valores de *imbalance* inferiores a 1%. Os *imbalance* representam uma medida do desequilíbrio de cálculo, ou seja, quanto as soluções conservam as quantidades envolvidas na resolução das equações de conservação [46] [47].

O ponto essencial para se obterem níveis de resíduos e *imbalance* tão baixos quanto possível é uma correta definição dos parâmetros de cálculo no CFX-Pre, em particular os valores de passo de tempo (*timestep*) e de número de iterações (*coefficient loops*). Numa primeira instância, estes parâmetros foram essencialmente arbitrados. Após a obtenção dos resíduos de cálculo relativos à primeira simulação, avançou-se então para a sua otimização, por intermédio de uma segunda simulação. Os parâmetros de cálculo utilizados nas duas simulações estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Parâmetros de cálculo utilizados na “Simulação 1” e na “Simulação 2”.

| Parâmetro | Simulação 1 | Simulação 2 |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| Analysis Type | Transient | Transient |
| Total Time [s] | 3 | 3 |
| First Update Time [s] | 0.0 | 0.0 |
| Timestep Update Freq. | 1 | 1 |
| Initial Timestep [s] | 0.01 | 0.005 |
| Maximum Timestep [s] | 1 | 1 |
| Minimum Timestep [s] | 0.01 | 0.005 |
| Target Max. Loops | 5 | 9 |
| Target Min. Loops | 3 | 3 |
| Timestep Decrease Fac. | 0.8 | 0.8 |
| Timestep Increase Fac. | 1.06 | 1.06 |
| Initial Time [s] | 0 | 0 |
| Solver Control | | |
| Min. Coeff. Loops | 1 | 1 |
| Max. Coeff. Loops | 6 | 10 |
| Residual Target | 5E-5 | 1E-5 |

Como se pode verificar, entre a “Simulação 1” e a “Simulação 2”, optou por se aumentar o número máximo de iterações de 6 para 10 e diminuir o passo de tempo de 0,01 segundos para 0,005 segundos. Desta forma procedeu-se a uma afinação da discretização temporal da simulação. O resíduo alvo foi também alterado de $5E-5$ para $1E-5$.

A Figura 4.5 e a Figura 4.6 apresentam a evolução dos resíduos relativos às equações de conservação de massa e *momentum* e das equações de conservação de energia obtidas na “Simulação 1” e na “Simulação 2”, respetivamente.

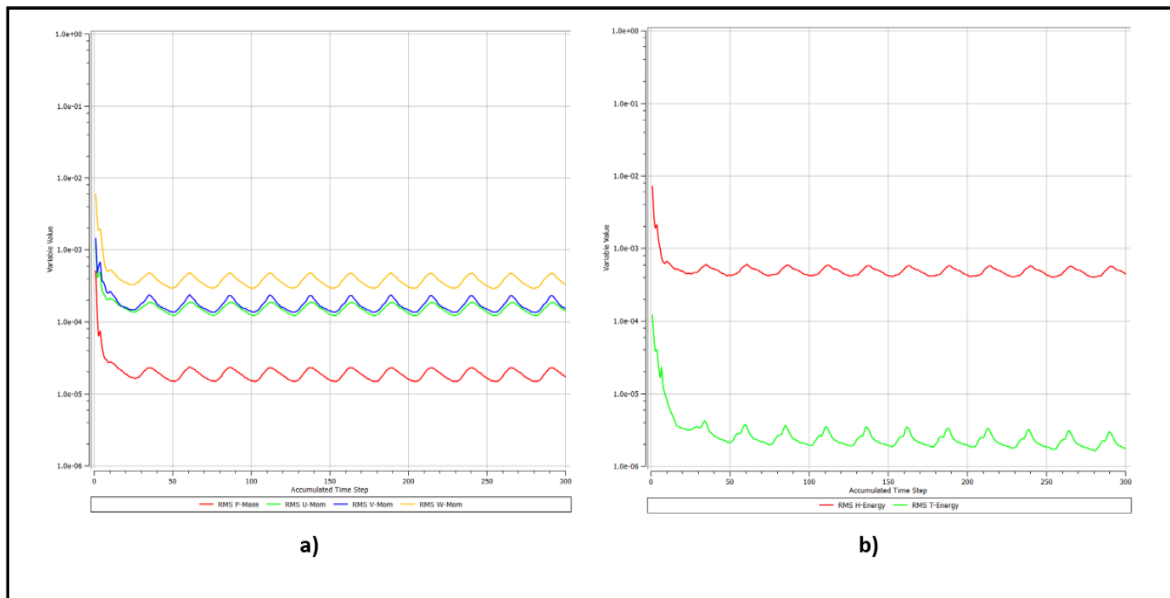


Figura 4.5. Resíduos relativos à “Simulação 1”; a) Massa e *momentum*; b) Energia.

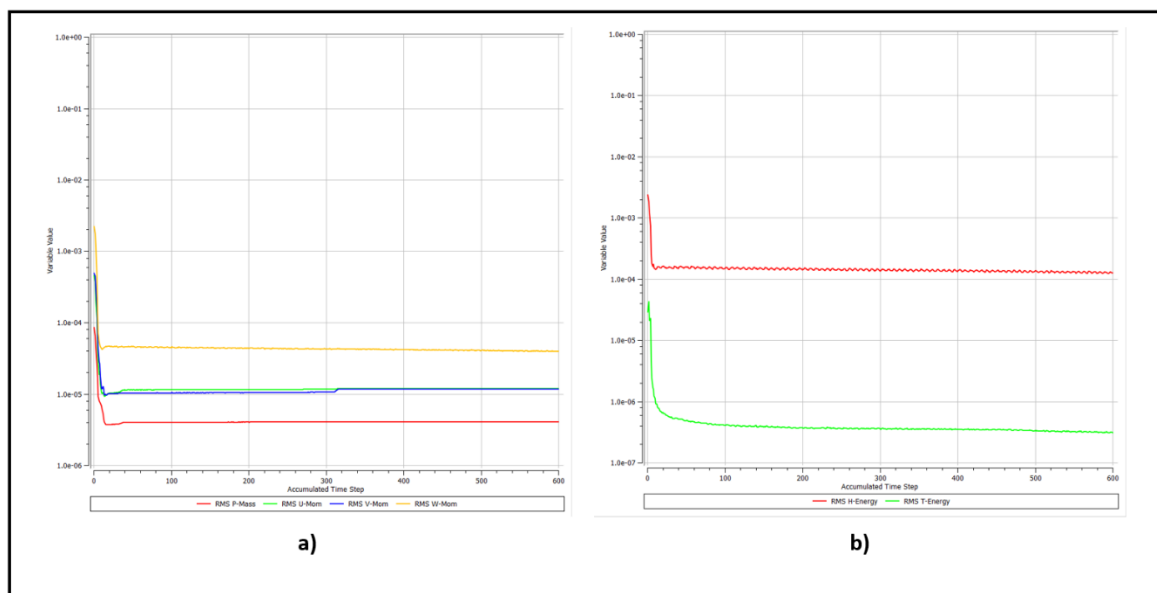


Figura 4.6. Resíduos relativos à “Simulação 2”; a) Massa e *momentum*; b) Energia.

A Figura 4.7 e a Figura 4.8 expõem os valores de *imbalance* relativos aos domínios de arrefecimento, molde e garrafa obtidos na “Simulação 1” e na “Simulação 2”, respetivamente.

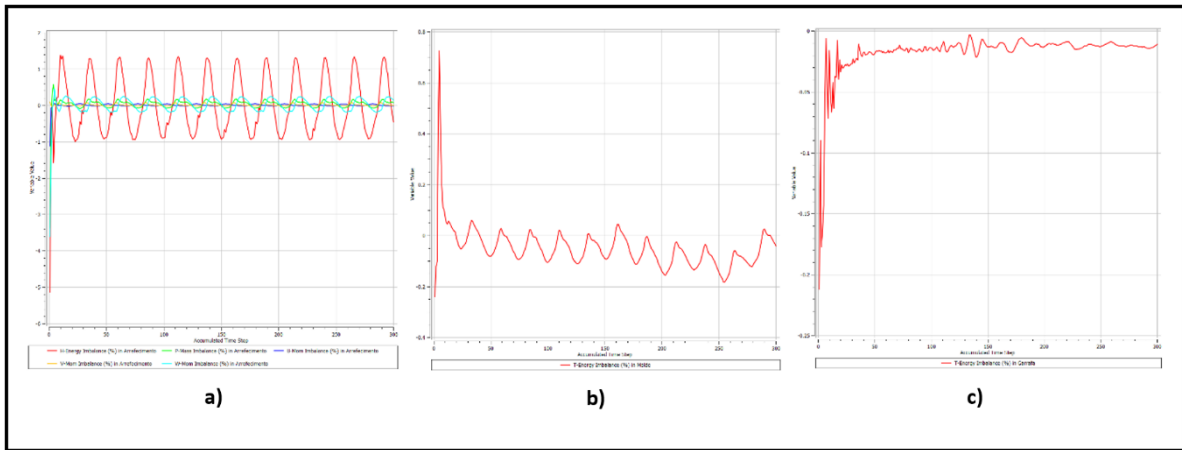


Figura 4.7. Resultados de *Imbalance* obtidos na “Simulação 1” para os diferentes domínios; a) Arrefecimento; b) Molde; c) Garrafa.

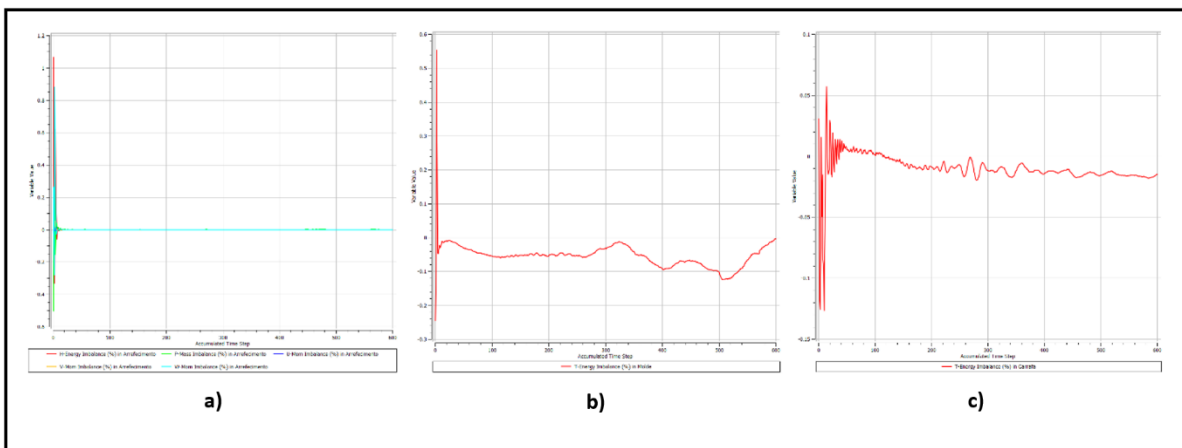


Figura 4.8. Resultados de *Imbalance* obtidos na “Simulação 2” para os diferentes domínios; a) Arrefecimento; b) Molde; c) Garrafa.

De acordo com o apresentado, verifica-se que na “Simulação 2” os níveis de resíduos convergem rapidamente e ficam, na sua generalidade, muito perto de $1E-5$. Os valores de *imbalance* são também baixos, com grande incidência abaixo de 1%. Contrariamente, na “Simulação 1”, verifica-se que os níveis de resíduos e *imbalance* são superiores e oscilantes. No entanto, dado que nem sempre resíduos elevados são indicativos de uma má resolução relativamente ao objetivado, procedeu-se à interpretação de

determinados resultados de interesse no sentido de se perceber se foi atingida a convergência de resultados. Essa análise encontra-se exposta na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Valores de interesse considerados para análise de convergência de resultados.

| Valores de interesse | Simulação 1 | Simulação 2 |
|--|--------------------|--------------------|
| Temperatura máxima na face do molde | 511,38 | 511,38 |
| Valor máximo do perfil de velocidades nos furos de arrefecimento num plano a 220mm do fundo | 145,69 | 145,91 |
| y⁺ máximo nos furos de arrefecimento num plano a 220mm do fundo | 2,51 | 2,51 |
| Duração do cálculo | 2d 5h 23m 54s | 7d 3h 40m 24s |

Rapidamente se depreende que a “Simulação 1” cumpre os requisitos necessários para ser considerada uma boa simulação numérica. De facto, com uma duração de cálculo muito menor do que o observado na “Simulação 2”, atingem-se resultados semelhantes relativamente aos valores de interesse analisados. Isto significa que os níveis de resíduos superiores característicos da “Simulação 1” se devem, eventualmente, a recirculação e inconstâncias no escoamento de ar após a sua saída dos furos de arrefecimento, ou seja, a jusante do molde. Desta forma se conclui que se obteve a convergência de resultados e que posteriormente em simulações semelhantes, podem ser utilizados os parâmetros de cálculo da primeira simulação.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. Determinação da resistência térmica de contacto entre o vidro e a face moldante

Por intermédio de simulação numérica foi determinado o valor de $3,3E10^{-4}$ $m^2.K.W^{-1}$ como resistência térmica de contacto entre o vidro e a face moldante, o que equivale a uma condutância térmica de contacto de $3000 W.m^{-2}.K^{-1}$. Este valor foi determinado por tentativas até que no fim da simulação (3 segundos de contacto) com o molde em bronze-alumínio a temperatura máxima na face da garrafa se situasse em volta dos $600^{\circ}C$, cumprindo o verificado nas termografias efetuadas em curso de produção. Como já referido trata-se de uma aproximação necessária a este tipo de problemas, no entanto perfeitamente plausível tendo em conta o verificado nas referências bibliográficas.

5.2. Análise comparativa entre moldes de ferro fundido e bronze-alumínio

Neste ponto são apresentados os resultados essenciais para um correto termo de comparação entre a utilização de moldes de acabar em bronze-alumínio e ferro fundido.

A simulação com o material ferro fundido foi estendida até aos 4 segundos. Deste modo, determinou-se a duração de contacto do vidro com o molde necessária para que a temperatura máxima na face da garrafa fosse igual à verificada com o material bronze-alumínio ao fim dos 3 segundos nominais de moldação. Esta necessidade é, desde logo, indicativa das melhores propriedades termofísicas do bronze-alumínio que permite um arrefecimento mais rápido do vidro.

5.2.1. Variação de temperatura na face da garrafa

Neste processo de fabrico o foco é a correta moldação da embalagem de vidro. Deste modo, o ponto de partida essencial para a correta comparação dos materiais do molde

é verificar a variação das temperaturas na face da garrafa durante a moldação, em particular a temperatura máxima pois é esta a temperatura crítica para a correta desmoldação do artigo.

5.2.1.1. Molde em bronze-alumínio

A Figura 5.1 apresenta a variação temporal das temperaturas máxima e mínima na face da garrafa durante a moldação com o molde em bronze-alumínio.

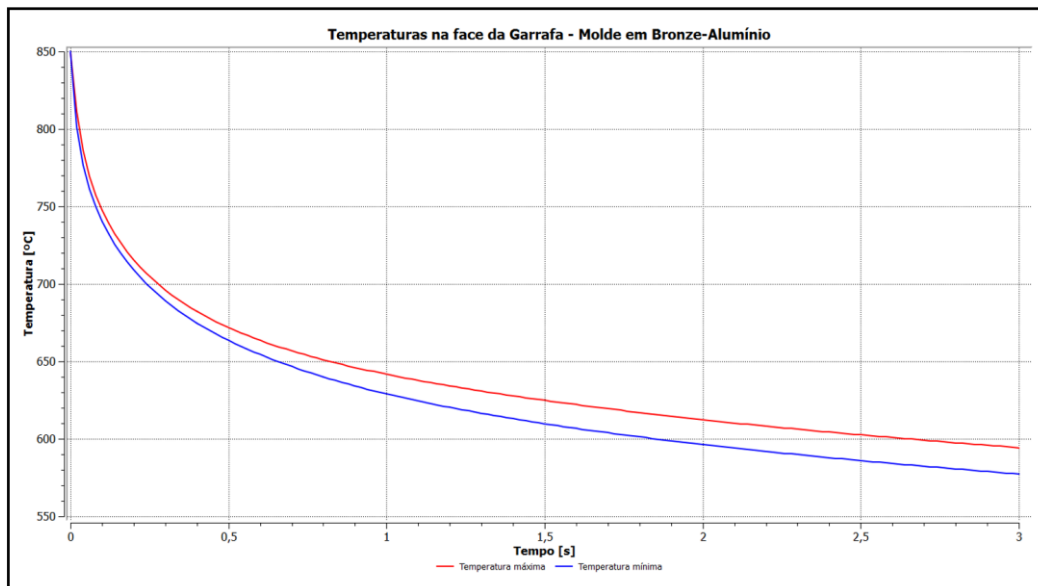


Figura 5.1. Variação das temperaturas máxima e mínima na face da Garrafa - molde em bronze-alumínio.

Verifica-se que no fim dos 3 segundos de moldação, a temperatura máxima na face da garrafa se situa em 594 °C e a temperatura mínima em 577 °C, ocorrendo portanto um diferencial de apenas 17 °C, indicativo de uma boa homogeneização de temperaturas.

5.2.1.2. Molde em ferro fundido

A Figura 5.2 representa a variação das temperaturas máxima e mínima na face da garrafa que ocorrem durante a moldação com molde em ferro fundido.

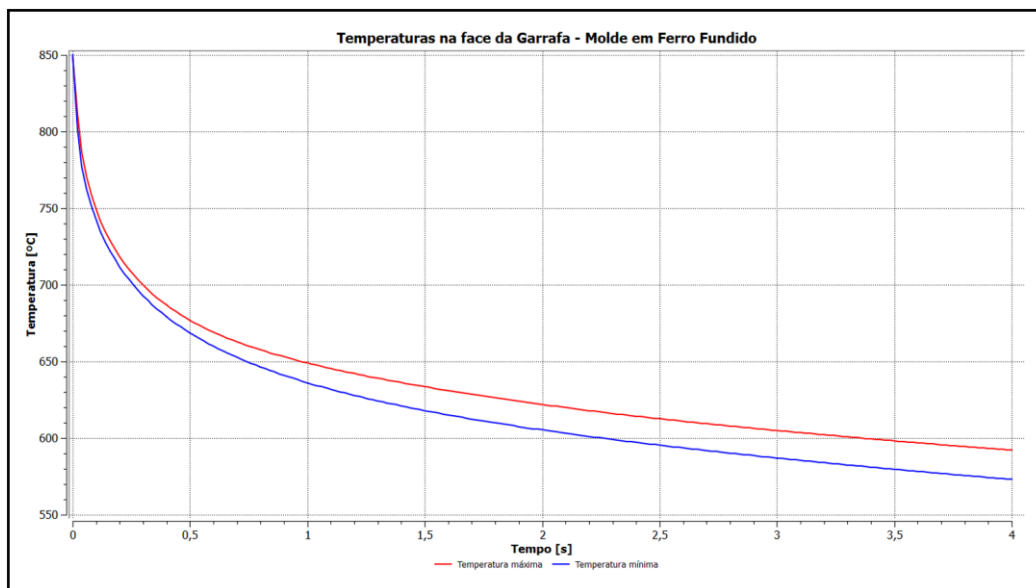


Figura 5.2. Variação das temperaturas máxima e mínima na face da Garrafa - molde em ferro fundido.

A figura anterior permite evidenciar que o ferro fundido tem uma capacidade bastante inferior de extrair calor ao vidro quando comparado com o bronze-alumínio. Com efeito, apenas aos 3,82 segundos de contacto, a temperatura máxima na face da garrafa atinge os 594 °C, com a temperatura mínima a situar-se nos 575 °C. O diferencial de temperaturas é de 19 °C, ligeiramente superior ao verificado com o molde em bronze-alumínio, mas ainda assim, não é significativo.

5.2.2. Variação de temperatura na face moldante

Neste ponto apresenta-se uma comparação relativa entre as temperaturas existentes na face moldante, em virtude do contacto com o vidro quente.

5.2.2.1. Molde em bronze-alumínio

A Figura 5.3 expõe a variação das temperaturas máxima e mínima verificadas ao nível da face moldante durante o contacto com o vidro utilizando molde em bronze-alumínio.

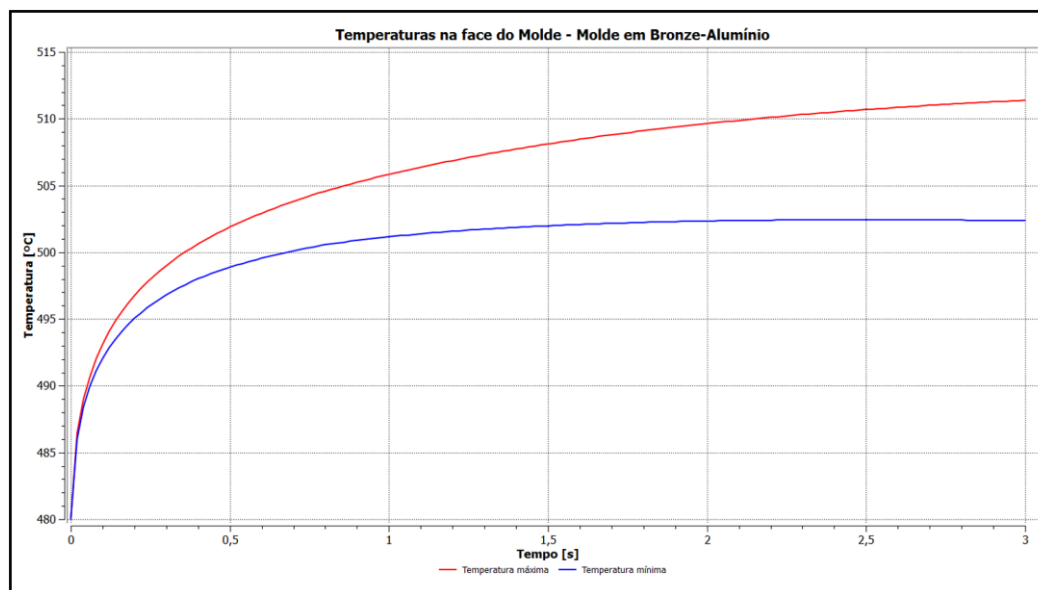


Figura 5.3. Variação das temperaturas máxima e mínima na face moldante - molde em bronze-alumínio.

Constata-se que no fim dos 3 segundos de contacto, a face de moldação em bronze-alumínio apresenta uma temperatura máxima de 511 °C e mínima de 502 °C.

5.2.2.2. Molde em ferro fundido

A Figura 5.4 apresenta a variação temporal das temperaturas máxima e mínima na face moldante com o molde em ferro fundido.

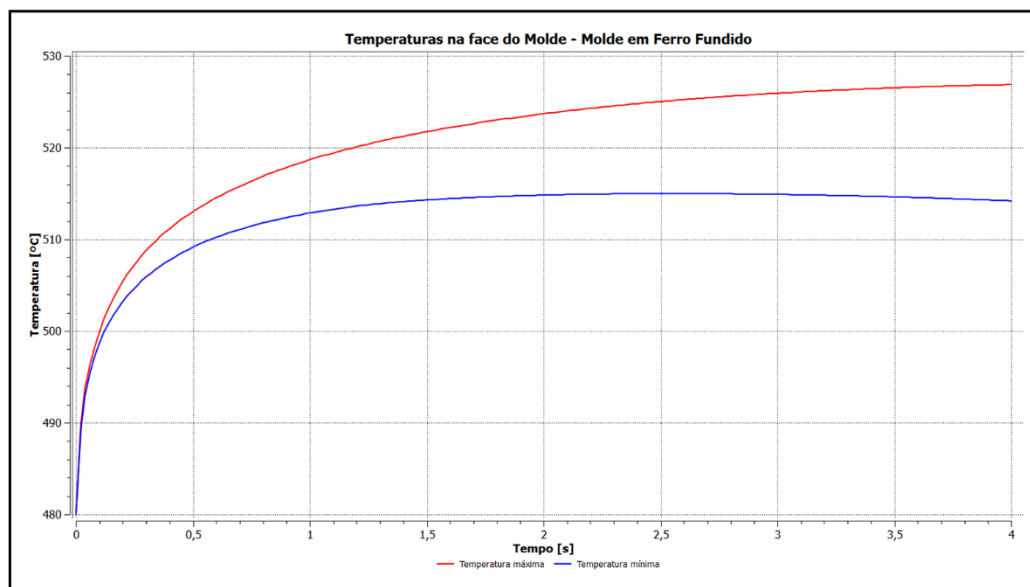


Figura 5.4. Variação das temperaturas máxima e mínima na face moldante - molde em ferro fundido.

Aos 3 segundos de moldação, a face do molde em ferro fundido apresenta uma temperatura máxima de 526 °C e mínima de 515 °C. Aos 3,82 segundos de contacto, ponto de desmoldação para o ferro fundido, a temperatura máxima subiu até aos 527 °C e a mínima desceu até aos 514 °C. De resto, por intermédio de análise gráfica, verifica-se uma tendência para a ocorrência de uma maior amplitude entre as temperaturas máxima e mínima na face moldante em ferro fundido. Em curso de produção, em regime cíclico, este facto leva a considerar a existência de maiores gradientes térmicos na face moldante que, por sua vez, tendem a influir negativamente no vidro por intermédio da ocorrência de defeitos.

5.2.3. Distribuição geral de temperaturas

Nos pontos anteriores foram abordadas as temperaturas na face da garrafa e na face moldante. Esta opção deveu-se pela possibilidade de uma interpretação mais intuitiva e pela existência de informação prévia decorrente das imagens por infravermelhos e do referido na bibliografia. Por outro lado, a face moldante possui também uma área elevada no mesmo eixo, o que facilita a visualização de resultados. No entanto, dado que se pretende possuir uma visão abrangente da distribuição de temperaturas em toda a área de moldação, apresenta-se a Figura 5.5, que inclui também a zona de moldação referente à zona do fundo e para ambos os materiais.

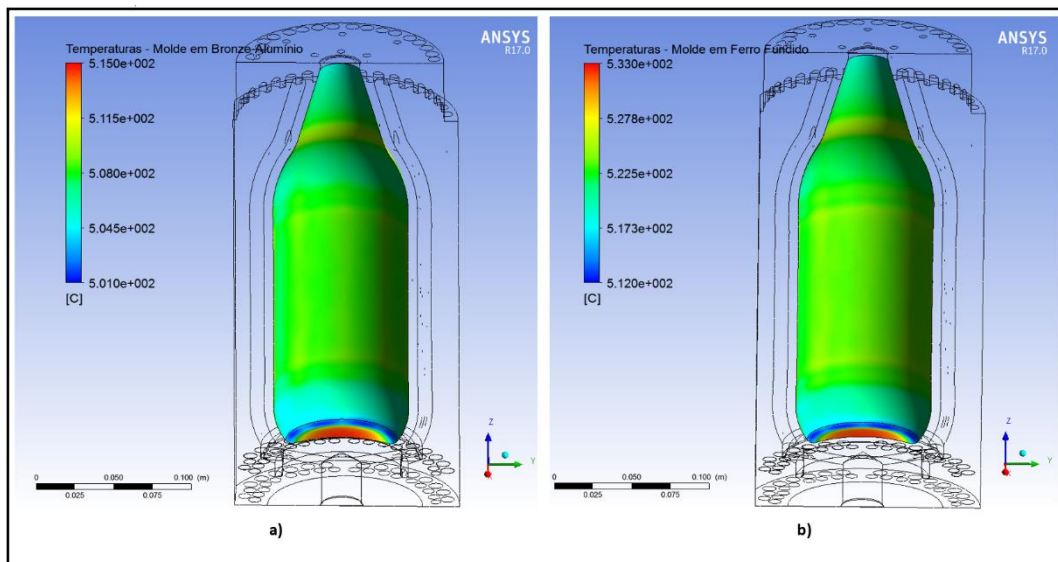


Figura 5.5. Distribuição de temperaturas em toda a área de moldação; a) Molde em bronze-alumínio; b) Molde em ferro fundido.

Conforme esperado, apesar dos materiais serem diferentes, a distribuição de temperaturas é bastante semelhante. Verifica-se que as temperaturas mais elevadas ocorrem nas zonas do peito e do fundo. Em particular, constata-se que no fundo é onde tendencialmente o molde mais aquece, que de acordo com a presente simulação atinge temperaturas de 515 °C e 533 °C, conforme o material seja em bronze-alumínio ou ferro fundido, respetivamente. A zona do calcanhar é aquela que apresenta temperaturas inferiores.

A ocorrência de maiores temperaturas na zona do peito e menores temperaturas na zona do calcanhar decorre do fenómeno de perpendicularidade em relação à superfície do fluxo de calor pelo mecanismo de transmissão por condução. Na zona do fundo, a face convexa do molde e a maior espessura de vidro naquela zona, conduzem a temperaturas superiores.

A Figura 5.6 apresenta as isotérmicas relativas a um corte transversal no molde de bronze-alumínio na zona correspondente ao peito da garrafa, local da face moldante onde as temperaturas são mais elevadas. Foi obtida por intermédio da ferramenta de reflexão do Ansys® CFX. Deste modo, o meio molde simulado foi utilizado para obter a simetria.

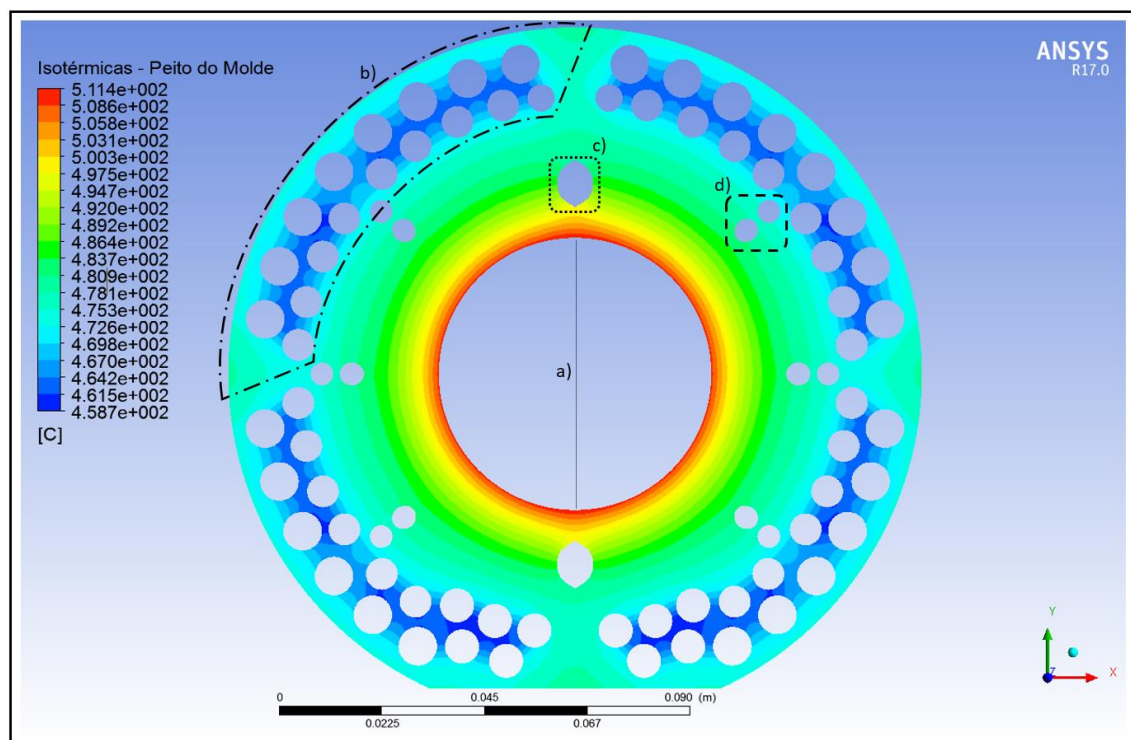


Figura 5.6. Isotérmicas em corte transversal no molde em bronze-alumínio – zona do peito; a) Plano de junta do molde; b) Furos de arrefecimento; c) Canal de vácuo principal na zona da junta do corpo; d) Canal de vácuo secundário.

Na Figura 5.6 é possível identificar as zonas mais frias devido à convecção forçada imposta pelo ar de arrefecimento e as zonas mais quentes devido ao contacto com o vidro. Na zona da junta do molde, devido à existência dos canais de vácuo principais muito próximos da cavidade moldante, as temperaturas tendem a ser superiores. Com efeito, os canais de vácuo atuam como resistência térmica devido ao baixo coeficiente de transmissão de calor, característico do ar a baixa pressão existente no seu interior.

5.2.4. Discussão de resultados

De acordo com o exposto, conclui-se que o molde em ferro fundido necessita de mais 0,82 segundos de contacto para a adequada extração de calor ao vidro, sendo notável que este valor corresponda a cerca de 27% dos 3 segundos de contacto com o molde em bronze-alumínio. Assim, verifica-se que o bronze-alumínio necessita de uma duração de contacto 21,5% inferior relativamente à opção ferro fundido, sendo bastante demonstrativo das suas melhores propriedades termofísicas e dando indicação das maiores cadências de produção proporcionadas.

Por outro lado, a própria temperatura à superfície da face de moldação tende a ser 3% inferior no molde em bronze-alumínio. Obviamente este valor é apenas indicativo da menor necessidade de arrefecimento com a utilização de coleções de moldes neste material.

A Tabela 5.1 resume estes termos de comparação que foram obtidos pelas simulações numéricas, com destaque para a coluna da variação percentual que indica a diferença obtida pela utilização do bronze-alumínio em relação à opção anterior que se considera ser o ferro fundido.

Tabela 5.1. Termos comparativos entre a utilização de moldes em ferro fundido e bronze-alumínio.

| | Ferro fundido | Bronze-alumínio | Variação [%] |
|--|----------------------|------------------------|---------------------|
| Duração de contacto [s] | 3,82 | 3 | - 21,5 |
| Temperatura máxima na face de moldação [°C] | 527 | 511 | - 3,0 |

5.3. Temperaturas na embalagem e ocorrência de defeitos

Os resultados da simulação numérica permitem fazer uma análise relativamente às zonas mais propícias à ocorrência de alguns defeitos de moldação.

Sabe-se que as sedas, fissuras no vidro, ocorrem preferencialmente nas zonas do peito, junta do corpo e fundo/calcanhar. Estas fissuras estão diretamente relacionadas com gamas de temperatura elevadas ou baixas, denominando-se como “sedas a quente” ou “sedas a frio”, respetivamente. A Figura 5.7 e a Figura 5.8 apresentam a distribuição de temperaturas no corpo e no fundo da garrafa, respetivamente, constituindo-se como um precioso auxílio na análise pretendida.

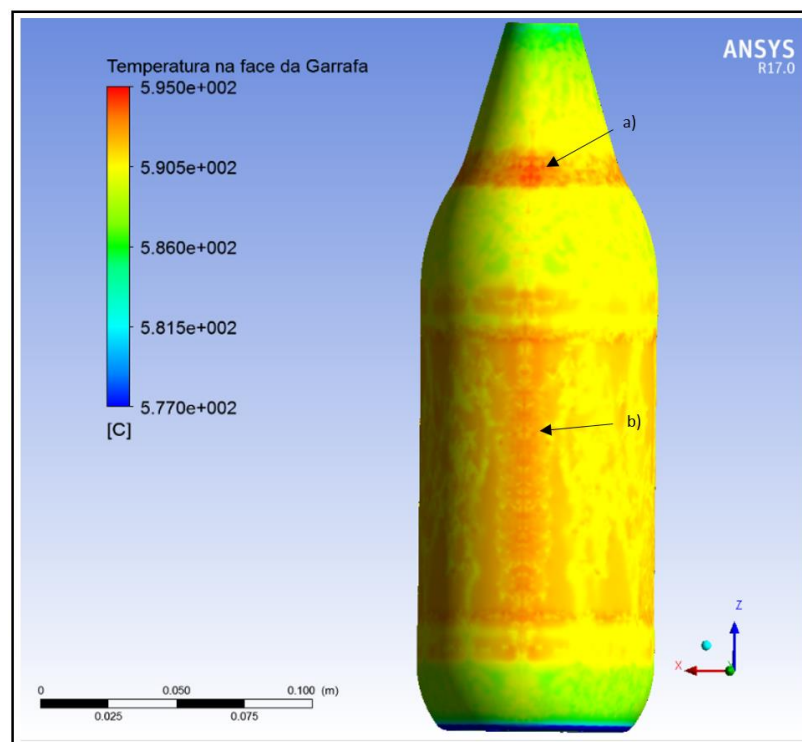


Figura 5.7. Distribuição de temperaturas na garrafa moldada; a) Zona do peito; b) Zona da junta do corpo.

Verifica-se que as temperaturas mais elevadas surgem ao longo da junta do corpo, em particular na zona do peito da garrafa onde, de forma localizada, se observa um efeito conjugado deste fenómeno. Como já referido, isto deve-se à existência dos canais de vácuo que atuam como resistência térmica naquela zona do molde, bem como ao comportamento do escoamento de calor por condução.

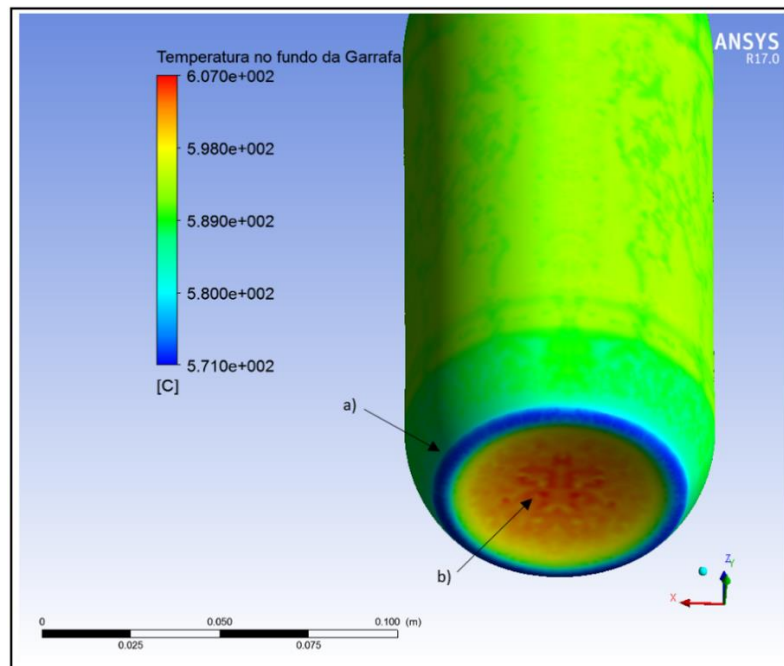


Figura 5.8. Distribuição de temperaturas no fundo da garrafa; a) Zona do calcanhar; b) Zona do fundo.

Por sua vez, a zona compreendida entre o calcanhar e o fundo é onde os gradientes térmicos são mais elevados. Se, por um lado, a temperatura na zona do calcanhar atinge valores mínimos, por outro lado, a temperatura no fundo tende para os máximos valores observados em toda a moldação.

5.3.1. Discussão de resultados

As zonas da embalagem de vidro que apresentam maiores diferenças térmicas resultam dos gradientes existentes na cavidade moldante. Embora no caso presente não se assista a amplitudes excessivas, as existentes são, no entanto, indicativas de zonas onde as temperaturas diferenciadas do vidro correspondem a viscosidades díspares e contrações desfavoráveis e bastante localizadas, originando tensões. Estas tensões de origem térmica, ocorrendo em zonas onde o fator de concentração de tensões é, inerentemente elevado devido às descontinuidades geométricas e raios de concordância, potenciam a ocorrência das fissuras. Estas resultam do próprio *design* da embalagem e são, portanto, difíceis de contornar. No entanto, um melhor dimensionamento do canal de vácuo principal, na zona da junta do molde, poderá trazer benefícios no sentido da homogeneização de temperaturas na face moldante, reduzindo assim as mais elevadas temperaturas habitualmente verificadas na zona da junta do corpo.

5.4. Estudo do arrefecimento

Apresenta-se neste ponto uma análise aos resultados referentes ao escoamento do ar no furos de arrefecimento do molde em bronze-alumínio e observados no final da simulação, ou seja, ao fim de 3 segundos. O conhecimento das características do escoamento do ar, para além do interesse que desperta por se tratar de algo até agora desconhecido e não quantificado, permite retirar ilações importantes em termos práticos para as áreas de projeto e desenvolvimento de moldes.

Os diâmetros e disposição dos furos de ventilação obedecem a indicações de projeto, a otimizações baseadas em conhecimento empírico e experimentação, bem como em constrangimentos de posicionamento e montagem dos moldes na máquina de moldação.

Como ponto inicial, apresenta-se a Figura 5.9 que, para além de identificar os diâmetros nominais, apresenta também os perfis de velocidade do ar de arrefecimento nos diferentes furos. O corte apresentado é transversal num plano a 220mm do fundo, local onde o fluido ultrapassou já o comprimento da região de entrada e, portanto, situado na região de escoamento desenvolvido em todos os furos (ANEXO E) [28] [44].

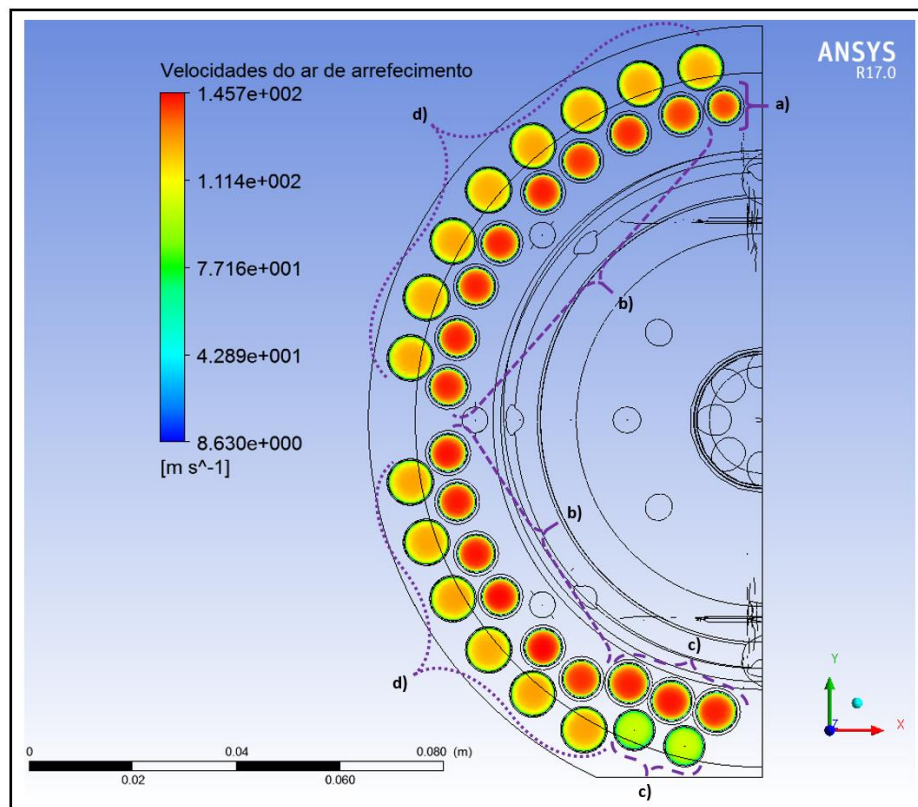


Figura 5.9. Perfis de velocidade do ar de arrefecimento nos furos do molde; a) Furo de 6mm de diâmetro; b) Furos de 7mm de diâmetro; c) Furos de 7,5mm de diâmetro; d) Furos de 8,5mm de diâmetro.

Todos os moldes para embalagens de litro de cerveja apresentam a furação ilustrada na Figura 5.9. Existem duas carreiras de furos cujos diâmetros nominais são de 6mm, 7mm, 7,5mm e 8,5mm. No fundo do molde, na zona de entrada do ar, por opção de projeto todos possuem um diâmetro 0,5mm superior. Por outro lado, na carreira interior de furos, na zona de saída do ar e de forma muito localizada, a geometria é cônica para permitir um efeito difusor. Dada a pequena extensão destas características, considera-se doravante o diâmetro nominal para efeitos de cálculo e apresentação de resultados.

Por observação da Figura 5.9, depreende-se que as maiores velocidades do ar ocorrem nos furos da carreira interior, sendo que os perfis indicam velocidades máximas na ordem de 146 m.s^{-1} . No entanto, tratando-se de um escoamento interno, sabe-se que estas velocidades correspondem à zona central dos furos. Como, devido à condição de aderência parietal, a velocidade vai diminuindo no sentido radial até velocidade nula junto às paredes, para uma correta mensuração torna-se necessário trabalhar com velocidades médias [44]. A Tabela 5.2, para além de resumir as características dimensionais dos diferentes furos, apresenta também as suas velocidades médias e caudal volúmico associado, valores constantes pois trata-se de um escoamento incompressível em furos de área transversal constante. A determinação destes valores foi baseada num furo aleatório de cada diâmetro pois a diferença de características de escoamento entre furos do mesmo diâmetro é desprezável.

Tabela 5.2. Dimensões características e valores de velocidade e caudal volúmico nas diferentes gamas de furos.

| Diâmetro [m] | Comprimento [m] | Área transversal nominal [m ²] | Área superficial real [m ²] | Velocidade média [m.s ⁻¹] | Caudal volúmico [m ³ .s ⁻¹] |
|--------------------------|-----------------|--|---|---------------------------------------|--|
| 0,006 (interior) | 3,09E-01 | 2,83E-05 | 5,90E-03 | 111 | 3,14E-03 |
| 0,007 (interior) | 3,09E-01 | 3,85E-05 | 6,87E-03 | 110 | 4,25E-03 |
| 0,0075 (interior) | 3,09E-01 | 4,42E-05 | 7,35E-03 | 114 | 5,03E-03 |
| 0,0075 (exterior) | 2,69E-01 | 4,42E-05 | 6,52E-03 | 81 | 3,60E-03 |
| 0,0085 (exterior) | 2,69E-01 | 5,67E-05 | 7,28E-03 | 99 | 5,61E-03 |

As velocidades médias situam-se entre os 80 m.s^{-1} e 110 m.s^{-1} , não se constantando diferenças muito acentuadas entre os diferentes diâmetros. Os furos da carreira exterior possuem velocidades inferiores pois a sua saída encontra-se estrangulada. A Figura 5.10 ilustra as linhas de fluxo do ar de arrefecimento, com o pormenor relativo ao desvio sofrido pelo ar na saída pela carreira exterior de furos.

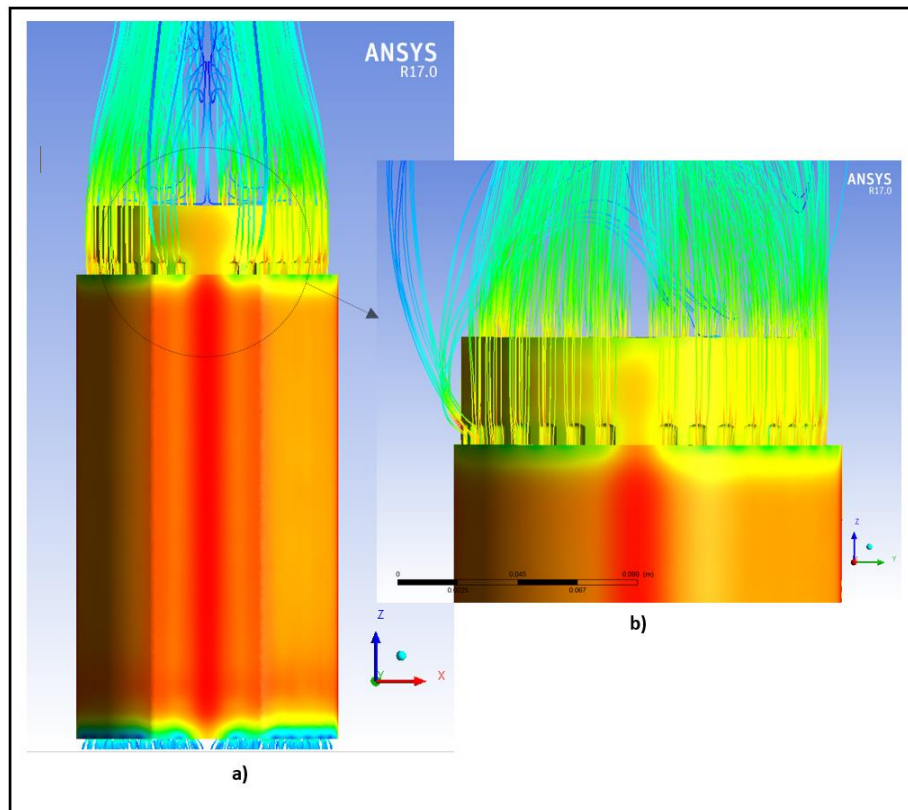


Figura 5.10. Linhas de fluxo do ar de arrefecimento; a) Vista geral; b) Pormenor relativo à saída do ar na carreira exterior de furos.

Por observação das linhas de fluxo, desde logo se aconselha que futuramente a furação da carreira exterior de furos seja efetuada em toda a altura do molde ou até uma altura superior ao utilizado atualmente realizando chanfragem na saída. Esta operação permitiria não restringir o escoamento de ar e aumentar a área de transferência térmica.

Por outro lado, recomenda-se a manutenção da geometria de difusor na exaustão pela carreira interior de furos. Por intermédio de simulação numérica, constata-se que a inexistência de difusores origina maior perturbação na saída do ar, interferindo de certo modo com o próprio escoamento e exaustão do ar de arrefecimento. Assim, conforme ilustrado na Figura 5.11, verifica-se por intermédio dos vetores de velocidade que os

difusores permitem diminuir a intensidade de recirculação no topo do molde, o que é conveniente.

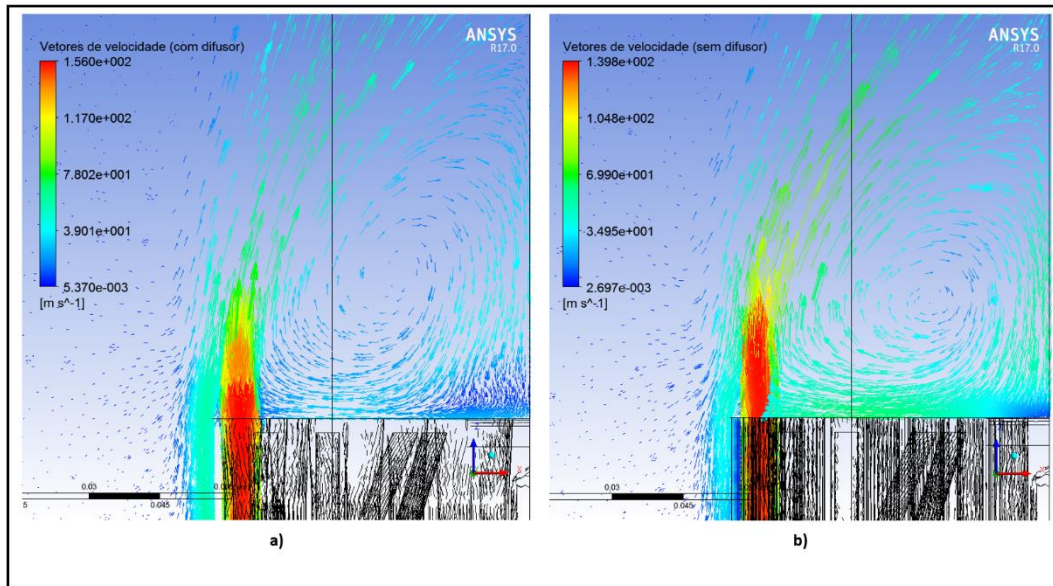


Figura 5.11. Vetores de velocidade do ar na saída por um furo da carreira interior; a) Molde com difusor; b) Molde sem difusor.

Continuando a análise aos regimes de escoamento do ar, apresenta-se a Tabela 5.3 que apresenta os valores de caudal mássico e Reynolds associados a cada diâmetro. Os resultados baseiam-se nas velocidades médias já apresentadas e nas propriedades do ar avaliadas à temperatura média de fluido, média aritmética entre as temperaturas de entrada e saída em cada furo [6].

Tabela 5.3. Valores de caudal mássico e Reynolds avaliados às propriedades de temperatura média do ar existente nas diferentes gamas de furos [6].

| Diâmetro [m] | Temperatura média do ar [K] | Massa volúmica [kg.m ⁻³] | Viscosidade dinâmica [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹] | Caudal mássico [kg.s ⁻¹] | Reynolds |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|----------|
| 0,006 (interior) | 401 | 8,69E-01 | 2,31E-05 | 2,73E-03 | 25095 |
| 0,007 (interior) | 385 | 9,11E-01 | 2,24E-05 | 3,86E-03 | 31393 |
| 0,0075 (interior) | 377 | 9,28E-01 | 2,20E-05 | 4,67E-03 | 36008 |
| 0,0075 (exterior) | 385 | 9,08E-01 | 2,24E-05 | 3,27E-03 | 24835 |
| 0,0085 (exterior) | 375 | 9,33E-01 | 2,19E-05 | 5,24E-03 | 35788 |

À semelhança dos valores de caudal volúmico, também os caudais mássicos são tendencialmente crescentes com o aumento do diâmetro. Apesar dos valores de velocidade não acompanharem esta tendência pela razão já referida, o valor de área transversal compensa essa desvantagem. Os números de Reynolds situam-se sensivelmente entre os 25000 e os 36000, o que significa a existência de escoamento turbulento completamente desenvolvido e a clara preponderância das forças de inércia sobre as forças de dissipação viscosa, resultado das elevadas velocidades do ar. Mais uma vez, é notório que as menores velocidades nos furos exteriores influem sobre este parâmetro que, ainda assim, indica tendência crescente para maiores diâmetros. Elevados Reynolds são importantes pois os escoamentos turbulentos são caracterizados pela existência de turbilhões que se revelam um mecanismo adicional nos processos de transferência de calor e *momentum*, contribuindo para a desejada dissipação de energia térmica do molde [28].

Os valores de fluxo térmico e consequentemente de potência térmica são aproximadamente constantes durante o arrefecimento do molde. A Tabela 5.4 resume estas grandezas para cada diâmetro de furo, bem como os valores de temperatura superficial média. Estes parâmetros, em conjugação com as temperaturas médias do ar, foram utilizados para a obtenção dos valores de coeficiente de transmissão de calor por convecção, por intermédio da lei de arrefecimento de Newton [6].

Tabela 5.4. Potências térmicas e coeficientes de transmissão de calor por convecção observados nas diferentes gamas de furos [6].

| Diâmetro [m] | Fluxo térmico [W.m⁻²] | Potência térmica [W] | Temperatura superficial média [K] | Coeficiente de transmissão de calor por convecção, h [W.m⁻².K⁻¹] |
|--------------------------|---|-----------------------------|--|---|
| 0,006 (interior) | 80907 | 477 | 740 | 239 |
| 0,007 (interior) | 84145 | 578 | 740 | 236 |
| 0,0075 (interior) | 83073 | 611 | 741 | 228 |
| 0,0075 (exterior) | 77746 | 507 | 735 | 222 |
| 0,0085 (exterior) | 85994 | 626 | 737 | 237 |

Estes resultados indicam que nos furos de arrefecimento se assistem a fluxos térmicos entre os 78000 e os 86000 W.m⁻². Os coeficientes de transmissão de calor por convecção situam-se acima dos 220 W.m⁻².K⁻¹, o que é notável pois situam-se junto às gamas máximas habitualmente verificadas em convecção forçada de gases [28].

5.4.1. Discussão de resultados

Com base no exposto entende-se que a furação está razoavelmente bem idealizada, com exceção da forma de exaustão do ar na carreira exterior de furos que, como já foi referido, deverá ser alterada de maneira a não restringir a saída do ar. Os resultados da simulação numérica permitem também concluir que os difusores devem ser mantidos em futuros projetos pois diminuem a recirculação no topo do molde. Em termos de diâmetros de furação e respetivas características de escoamento, entende-se que os furos de 6mm e 7mm de diâmetro são de evitar devido à menor área de transmissão térmica. Com efeito, apesar dos coeficientes de transmissão de calor por convecção serem muito semelhantes, o facto dos furos de maior diâmetro possuírem inerentemente uma maior área superficial, permitem a remoção de maiores potências térmicas. Por outro lado, os valores de Reynolds são superiores para os furos de 7,5mm e 8,5mm de diâmetro, permitindo uma maior remoção de calor por efeito turbilhonar. Deste modo, e considerando os constrangimentos de área disponível para execução da furação, consideram-se estes diâmetros como os mais vantajosos ao arrefecimento do molde. Noutra perspetiva, poderá revelar-se vantajosa a colocação dos furos de maior diâmetro na carreira interior e dos furos de menor diâmetro na carreira exterior, contrariamente ao que é feito atualmente. Esta opção poderá permitir um melhor arrefecimento. No entanto, para tal poderá ser necessário diminuir o número de furos de maneira a manter uma ponte térmica entre furos contíguos que permita uma correta passagem do calor até às zonas adjacentes à carreira exterior de furos. Dependendo da eficiência obtida por intermédio destas alterações, o maior caudal de ar necessário à alimentação dos furos de maior diâmetro poderá conduzir à utilização dos ventiladores na zona do seu maior rendimento e/ou a uma menor duração da ventilação num ciclo de moldação.

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURA

O processo de produção de embalagens de vidro é complexo e assente numa base de conhecimento empírico extremamente abrangente. A presente Dissertação abordou de forma geral os conceitos e variáveis presentes neste processo, numa perspetiva científica, sem deixar de sensibilizar para as dificuldades surgidas na transposição dos conceitos teóricos para a prática industrial. Com efeito, de uma forma prática mas ainda assim com o rigor necessário, o trabalho desenvolvido teve sempre em vista a discretização das variáveis a montante e diretas que influem sobre a fase de moldação de uma embalagem de vidro.

Através do *software* Ansys® CFX foi efetuada uma simulação numérica na perspetiva de transferência térmica, do arrefecimento e moldação de vidro de embalagem, considerando todas as variáveis necessárias à consistência de resultados. Dado tratar-se de um processo cíclico transiente, entende-se como maior fator limitativo a simulação de apenas um ciclo de moldação. No entanto, os resultados apresentados permitem retirar conclusões importantes e congruentes, com uma boa relação entre qualidade, duração de cálculo e consequente necessidade de armazenamento de dados. Independentemente da desvantagem descrita, futuramente poderão ser efetuadas simulações numéricas para otimizações de geometrias e de furações de arrefecimento, tendo em vista uma maior eficiência da etapa de moldação. Por outro lado, o conhecimento adquirido ao nível do *software* Ansys® CFX e da discretização espacial e temporal dos domínios de cálculo, permite que rapidamente sejam efetuadas simulações numéricas, quer a outros moldes de acabar, quer a moldes de principiar.

Os resultados da simulação numérica permitiram concluir que o material dos moldes influencia decisivamente nas cadências produtivas. Com efeito, sendo a duração de contacto entre o vidro e a face moldante fator decisivo na transferência térmica, o bronze-alumínio, devido à sua maior difusividade térmica, induz a durações de contacto cerca de 21% inferiores relativamente ao ferro fundido, material tipicamente utilizado nas ferramentas de moldação.

Noutra perspetiva, verificou-se que um melhor dimensionamento dos canais de vácuo existentes no molde, poderá conduzir a um arrefecimento da moldação de uma forma mais uniforme, reduzindo a incidência de defeitos de origem térmica. Isto deve-se ao facto do ar existente no interior dos canais de vácuo atuar como resistência térmica.

Relativamente ao escoamento do ar de arrefecimento, constata-se a existência de regimes turbulentos com elevados números de Reynolds e coeficientes de transmissão de calor. Os resultados permitem concluir que os furos com diâmetros entre 7,5 mm e 8,5 mm permitem uma maior remoção de potência térmica. Isto deve-se, por um lado, à maior área superficial para transferência de calor e, por outro, à maior turbulência existente nestes diâmetros.

Relativamente a opções de projeto, considera-se que na carreira interior de furos deve manter-se a saída de ar em difusor. Deste modo, a recirculação a jusante mantém-se em níveis relativamente baixos. No entanto, na carreira exterior de furos, não sendo possível optar por esta solução, aconselha-se que a furação seja efetuada em maior comprimento de maneira a não restringir tão intensamente a saída do ar.

Futuramente, ao nível de empresa, considera-se que a criação de um departamento de investigação e desenvolvimento que possa abordar estes e outros temas é viável. No entanto, idealmente como complemento, inserido nas áreas de desenvolvimento do produto, projeto de moldes e projeto industrial, sempre numa perspetiva de abrangência de conhecimentos e revelando sensibilidade relativamente a todo o processo produtivo e à agregação dos vários departamentos.

Em termos de investigação futura, considera-se pertinente o aprofundar da temática da resistência térmica de contacto entre o vidro e a face moldante. Investigações baseadas em condições de fabrico reais poderão fornecer resultados com maior grau de aproximação e, inerentemente, a determinação das gamas de resistência térmica indicadas ao maior rendimento da etapa de moldação.

A nível industrial, com o avançar da Indústria 4.0 e, conseqüentemente, do incremento em robótica, automação e sistemas ciber-físicos, todo o conhecimento adquirido em investigação pode levar a um melhor aproveitamento dos robôs de lubrificação que estão a começar a ser utilizados nas empresas de produção de vidro, através da programação para aplicação de películas de lubrificação controladas. Nesta linha de orientação, poderão começar a ser utilizados pirómetros ou até mesmo câmaras de infravermelhos para medição

automática em curso de produção das temperaturas dos moldes e das ferramentas de produção. Para além do simples registo e disponibilização de informação, o processamento dos dados envolvidos deverá ser utilizado para controlo e alteração automática dos parâmetros da máquina IS, do sistema de lubrificação e dos ventiladores para arrefecimento dos moldes. Estas informações deverão ser procesadas no sentido da obtenção de regimes estáveis de produção com elevados rendimentos, através da produção de embalagens de vidro com elevados padrões de qualidade e eficiência energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Frade, J. (2010), “Conformação automática de formas complexas em vidro de mesa”. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais. Departamento de Engenharia de Cerâmica e do Vidro - Universidade de Aveiro, Aveiro.
- [2] Dados da “Associação dos Industriais de Vidro de Embalagem”. Acedido a 17 de Junho de 2017, em <http://aive.pt/>.
- [3] Ferreira, I. (2001), “Caracterização da indústria de moldes na região da Marinha Grande, na óptica da qualidade”. Dissertação de Mestrado em Métodos Quantitativos em Gestão. Escola de Gestão do Porto – Universidade do Porto, Porto.
- [4] Akerman, M. (2000), “Natureza, estrutura e propriedades do vidro”, CETEV – Centro Técnico de Elaboração do Vidro, Saint-Gobain Vidros Brasil. Acedido a 11 de Junho de 2017, em <http://www.ceap.br/material/MAT10052011151508.pdf>.
- [5] Shand, E. (1968), “Engineering Glass”, Modern Materials, Vol. 6, Academic Press, New York, pp.262.
- [6] Incropera, F., Dewitt, D., Bergman, T., Lavine, T. (2011), “Fundamentals of heat and mass transfer”, 7nd ed., John Wiley & Sons.
- [7] Mari, E. A. (1982), “Los vidrios”, Editorial Americalee, Buenos Aires.
- [8] Tempel, L. (2002), “Thermal conductivity of a glass: II. The empirical model”, Glass Physics and Chemistry, Vol. 28, No 3, pp. 147 – 152.
- [9] Cooper, A. (1977), “Heat transfer in glass melting”, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 26, pp. 28 – 37.
- [10] Chui, G., Gardon, R. (1969), “Interaction of radiation and conduction in glass”, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 52, pp. 548 – 553.
- [11] Deidewig, F., Parkinson, G. (2001), “Transient temperature behaviour in blank and blow molds during normal container production on IS-machines”, Emhart Glass Manufacturing GmbH, Neuss, Germany. Acedido a 14 de Junho de 2017, em http://www.kdsolution.com/pdf_upload/Deidewig.pdf.
- [12] Deidewig, F., Müller, T., “Temperature distribution in blank and blow molds”, Emhart Glass SA. Acedido a 14 de Junho de 2017, em <http://old.emhartglass.com/files/A0033.pdf>.
- [13] Akerman, M. (2000), “A elaboração do vidro”, CETEV – Centro Técnico de Elaboração do Vidro, Saint-Gobain Vidros Brasil.
- [14] Acedido a 11 de Junho de 2017, em <http://www.glassglobal.com/consulting/images/end-port-regenerative.png>.

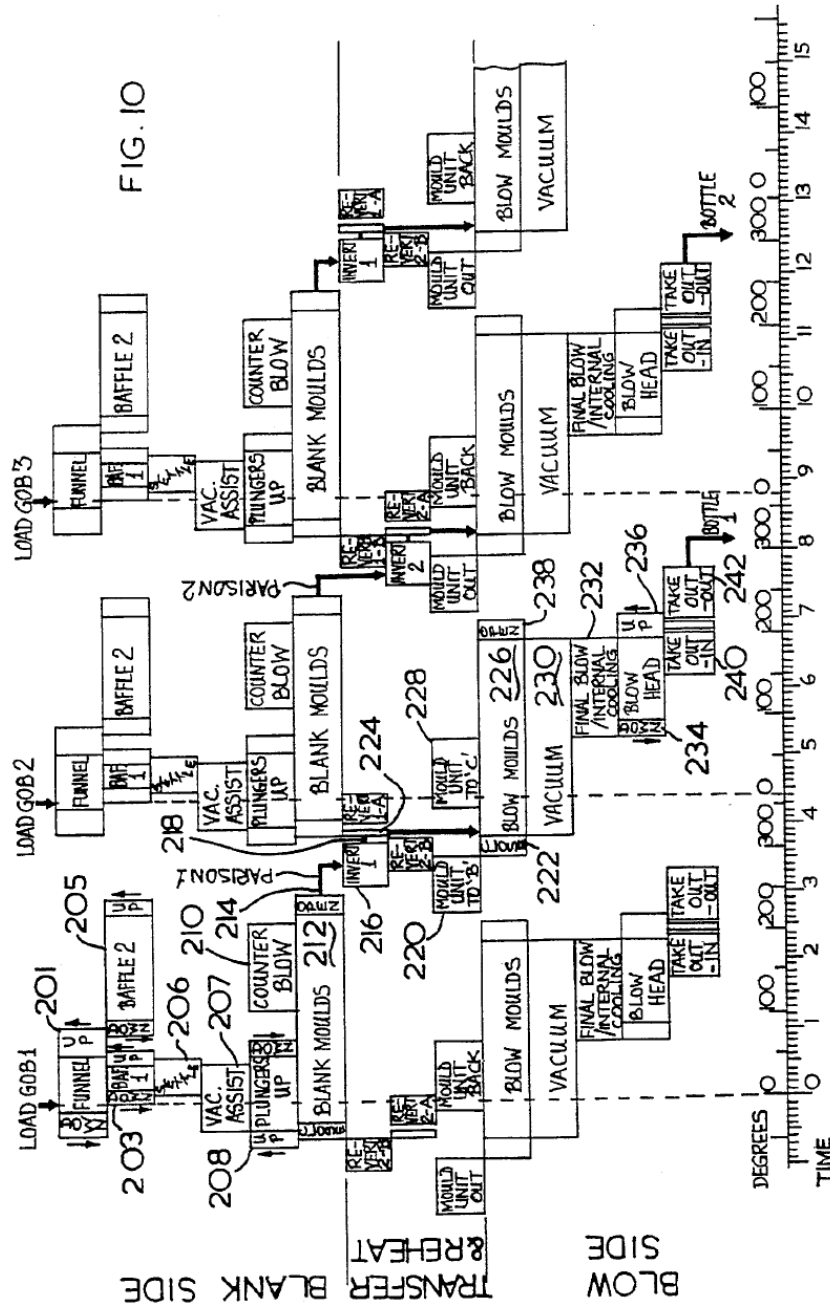
- [15] Acedido a 11 de Junho de 2017, em <http://www.waltec.de/wp-content/uploads/2012/10/vg-feeder-x3.jpg>.
- [16] Acedido a 12 de Junho de 2017, em http://www.santosbarosa.pt/index_i.php?num=3&sub=2&mod=11.
- [17] Acedido a 12 de Junho de 2017, em http://www.glasstec-online.com/fair/glasstec2016/exh/TREE/2/6/4/%7Bprod_image%7D%7B1423%7D%7B%7D.png.
- [18] Acedido a 12 de Junho de 2017, em <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/df/BlowblowAllSteps.png>.
- [19] Jones, S. (1997), “Individual section glass container forming machine”, U.S. Patent 5,649,991.
- [20] Acedido a 15 de Junho de 2017, em <http://www.intermolde.pt/ficheiros/imagens/normalresized/1332165978.jpg>.
- [21] Acedido a 15 de Junho de 2017, em <http://www.intermolde.pt/ficheiros/imagens/normalresized/1332165394.jpg>.
- [22] Acedido a 15 de Junho de 2017, em <http://www.intermolde.pt/ficheiros/imagens/normalresized/1332165190.jpg>.
- [23] Dakan, J., Schmidt, D. (1986), “Bronze alloy for glass container molds”, U.S. Patent 4,732,602.
- [24] Informações gentilmente cedidas pela empresa Intermolde Moldes Vidreiros Internacionais, Lda.
- [25] “Blow Mold Cooling – Emhart Glass Mold Design Engineering”, Emhart Glass SA.
- [26] Silva, C. (1999), “Simulação de processos de enformação de vidro e cálculo de tensões térmicas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Universidade do Porto, Porto.
- [27] Mikhailenko, N., Sarkisov, P., Mangutova, L. (2007), “Statistical evaluation of the effect of the mold temperature on the strength of glass containers”, Glass and Ceramics, Vol. 64, pp. 37 – 41.
- [28] Çengel, Y. (2006), “Heat Transfer: A Practical Approach”, 3th ed., McGraw-Hill.
- [29] Moreau, P., Lohegnies, D., Grégoire, S., César de Sá, J. (2008), “Analysis of lubrication in glass blowing: Heat transfer measurements and impact on forming”, Glass Technology, Vol. 49, pp. 8 – 16.
- [30] TOTAL® Kleenmold® 400 – Technical Data Sheet. Acedido a 18 de Junho de 2017, em http://www.lubadmin.com/upload/produit/FichePDF/lang_1/6624.pdf.
- [31] Grégoire, S., César de Sá, J., Moreau, P., Lohegnies, D. (2007), “Modelling of heat transfer at glass/mold interface in press and blow forming processes”, Computers & Structures, Vol. 85, pp. 1194 – 1205
- [32] Choudhary, M., Venuturumilli, R., Hyre, M. (2010), “Mathematical modeling of flow and heat transfer phenomena in glass melting, delivery, and forming processes”, International Journal of Applied Glass Science, Vol. 1, pp. 188 – 214.

-
- [33] Storck, K., Karlsson, M., Loyd, D. (1994), “Analysis of the blank mould - a transient heat transfer problem in glass forming”, Transactions on Engineering Sciences, Vol. 5, WIT Press.
- [34] Pchelyakov, S., Guloyan, Y. (1985), “Heat transfer at the glass-mold interface”, Glass and Ceramics, Vol. 42, pp. 400 – 403.
- [35] Grégoire, S. (2006), “Identification du coefficient de transfert de chaleur à l’interface verre/outils de formage et prise en compte dans la modélisation par Eléments Finis des procédés de formage de verre”. Thèse en cotutelle présentée à l’université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis en vue de l’obtention des grades de Docteur en Génie Mécanique.
- [36] McGraw, D. (1961), “Transfer of heat in glass during forming”, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 44, pp. 353 – 363.
- [37] Acedido a 21 de Junho de 2017, em http://www.santosbarosa.pt/index_i.php?num=3&sub=2&mod=19.
- [38] Acedido a 18 de Junho de 2017, em http://www.toyo-glass.co.jp/english/tec_ass/lightweighting_tec/design_tech01.html.
- [39] FLIR SYSTEMS™. ThermaCAM™ Researcher User’s Manual Professional Edition. Version 2.7 SR – 1.
- [40] Acedido a 19 de Junho de 2017, em http://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html.
- [41] Ansys®, Inc. (2016). ANSYS® CFX – Solver Modeling Guide. Release 17.0.
- [42] Acedido a 1 de Julho de 2017, em <https://www.computationalfluidynamics.com.au/turbulence-part-3-selection-of-wall-functions-and-y-to-best-capture-the-turbulent-boundary-layer/>.
- [43] Acedido a 1 de Julho de 2017, em <https://www.computationalfluidynamics.com.au/tips-tricks-cfd-estimate-first-cell-height/>.
- [44] Oliveira, L. A., Lopes, A. G. (2010), “Mecânica dos Fluidos”, 3ª Ed., ETEP – Edições Técnicas e Profissionais.
- [45] Ansys®, Inc. (2016). ANSYS® Meshing User’s Guide. Release 17.0.
- [46] Acedido a 2 de Julho de 2017, em <https://caesai.com/blog/has-my-cfd-analysis-converged-part-i>.
- [47] Ansys®, Inc. (2016). ANSYS® CFX – Solver Manager User’s Guide. Release 17.0.

ANEXO A

| Composto químico | Função | Descrição | Quantidade ponderal [%] |
|--|---------------|--|--------------------------------|
| Silício, SiO ₂ | Vitrificante | Elemento estruturante | 72-74 |
| Óxido de Sódio, Na ₂ O | Fundente | Facilita a fusão do silício | 12-14 |
| Óxido de Cálcio, CaO | Estabilizador | Estabilizador químico | 9-10 |
| Óxido de Magnésio, MgO | Estabilizador | Melhoria das propriedades mecânicas e do patamar de trabalho | 1-3 |
| Óxido de alumínio, Al ₂ O ₃ | Estabilizador | Melhoria da resistência mecânica e química | 1-2 |
| Óxido de Crômio, Cr ₂ O ₃ ; Óxido de Ferro, Fe ₂ O ₃ ; Carvão; Etc. | Corantes | Conferir cor ao vidro (Âmbar, Verde, etc.) | - |
| Casco | Material | Poupança energética e ambiental | 0-75 |

ANEXO B



ANEXO C

| Constituição típica das ligas de bronze-alumínio utilizadas nos moldes para vidro de embalagem | |
|---|----------------------------|
| Constituinte | Quantidade ponderal |
| Fe | < 1,00 |
| Mn | < 0,40 |
| Al | 6,50 +/- 0,50 |
| Ni | 15,00 +/- 1,00 |
| Zn | 8,00 +/- 1,00 |
| Pb | < 0,10 |
| Sn | < 0,15 |
| Cu | Restante |

| Constituição típica das ligas de ferro fundido Lamelar utilizada nos moldes para vidro de embalagem | |
|--|----------------------------|
| Constituinte | Quantidade ponderal |
| C | 3,57 +/- 0,08 |
| Mn | 0,60 +/- 0,10 |
| Si | 2,00 +/- 0,10 |
| P | < 0,20 |
| S | 0,04 +/- 0,02 |
| Cr | < 0,20 |
| Ni | < 0,50 |
| Mo | 0,53 +/- 0,08 |
| V | 0,12 +/- 0,03 |
| Ti | 0,15 +/- 0,05 |

ANEXO D

| Propriedades do lubrificante TOTAL® – KleenMold® 400 | |
|---|------------------------------|
| Aparência | Líquido viscoso de cor preta |
| Odor | Enxofre e petróleo |
| Densidade a 25 °C | 8,0 |
| Viscosidade a 25 °C | 5000 a 7000 |
| Flash Point | 160 °C (mínimo) |
| Componentes [%] | Grafite – 4,2 a 5,2 |
| | Enxofre – 4,0 a 5,0 |
| | Óleo de Petróleo – 70 a 80 |
| | Aditivos – 20 a 30 |

ANEXO E

Determinação do comprimento da região de entrada hidrodinâmica ou região de escoamento desenvolvido, L_e .

Como se verifica que o escoamento é turbulento em todos os furos, tem-se:

$$Re > 2300 \Rightarrow L_e = 4,4. (Re)^{1/6}. d$$

Deste modo, obtém-se para cada diâmetro de furo os comprimentos da região de entrada hidrodinâmica descritos na tabela seguinte:

| Diâmetro [m] | Reynolds | Comprimento de entrada hidrodinâmico, L_e [m] |
|---------------------|-----------------|---|
| 0,006 (interior) | 25095 | 0,143 |
| 0,007 (interior) | 31393 | 0,173 |
| 0,0075 (interior) | 36008 | 0,190 |
| 0,0075 (exterior) | 24835 | 0,178 |
| 0,0085 (exterior) | 35788 | 0,215 |

Determinação do comprimento da região de entrada térmica, L_t .

Como se verifica que o escoamento é turbulento em todos os furos, tem-se:

$$Re > 2300 \Rightarrow L_t = 10. d$$

Deste modo, obtém-se para cada diâmetro de furo os comprimentos da região de entrada térmica descritos na tabela seguinte:

| Diâmetro [m] | Reynolds | Comprimento de entrada térmica, L_t [m] |
|---------------------|-----------------|---|
| 0,006 (interior) | 25095 | 0,060 |
| 0,007 (interior) | 31393 | 0,070 |
| 0,0075 (interior) | 36008 | 0,075 |
| 0,0075 (exterior) | 24835 | 0,075 |
| 0,0085 (exterior) | 35788 | 0,085 |

