



M 2019

U. PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

A SIMULAÇÃO NO PROJETO E ENCHI- MENTO DE CAIXAS DE MACHO

HENRIQUE CORDEIRO CORREIA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Prof. Luís Filipe Malheiros
ORIENTADOR
PROFESSOR, FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Julho 2019

| | | | |
|------------------|---|---------------|-------------|
| CANDIDATO | HENRIQUE CORDEIRO CORREIA | CÓDIGO | UP201405477 |
| TÍTULO | A SIMULAÇÃO NO PROJETO E ENCHIMENTO DE CAIXAS DE MACHO | | |
| DATA | 23 DE JULHO DE 2019 - 09H00MIN | | |
| LOCAL | FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO - SALA 106 | | |

| JÚRI | | |
|-------------------|----------------------------------|--------------|
| PRESIDENTE | MANUEL FERNANDO GONÇALVES VIEIRA | DEMM - FEUP |
| ARGUENTE | HÉLDER JESUS FERNANDES PUGA | DEM - UMINHO |
| ORIENTADOR | LUÍS FILIPE MALHEIROS | DEMM / FEUP |

RESUMO

O fabrico de machos reveste-se de capital relevância em fundição para que as peças produzidas apresentem elevada qualidade. Assim, o conhecimento do seu processo de fabrico, das variáveis envolvidas, e das suas limitações é muito importante para que os machos produzidos sejam de qualidade.

Nesta dissertação, são abordados os processos de fabrico de machos disponíveis no mercado, com maior incidência no processo de caixa fria, que utiliza uretanos fenólicos; é ainda abordada a importância de que se reveste o *design* da caixa de macho no fabrico de machos.

É igualmente analisado o impacto que a simulação pode vir a ter neste tipo de processos, nomeadamente a possibilidade da sua utilização viabilizar a otimização do projeto das caixas de machos, sobretudo ao nível da localização dos respiros e da redução do consumo de matérias-primas, aumentando assim a produtividade.

Foi ainda realizado um estudo sobre os *softwares* que permitem a simulação do enchimento de caixas de macho disponíveis no mercado, tendo-se frisado as diferenças entre o FLOW-3D, o QuikCAST e o Arena-flow.

Foram realizadas diversas simulações, utilizando os dois primeiros, os únicos que estavam disponíveis, com vista a analisar a sua aplicabilidade como ferramenta de auxílio e otimização do projeto de caixas de machos. Os resultados obtidos permitiram concluir que ambos os *softwares* estão bem aquém das expectativas inicialmente criadas; no entanto, de entre os dois, o QuikCAST afigura-se mais promissor.

PALAVRAS-CHAVE

Fabrico de machos, caixa de macho, *software* de simulação, otimização.

ABSTRACT

Cores manufacturing is of capital importance in foundry for guaranteeing a high quality of the parts to be produced. Thus, knowledge of the manufacturing processes, the variables involved, and their limitations are very important for the quality of the cores produced.

In this dissertation, the manufacturing processes are discussed, mainly the Phenolic Urethane Cold Box (PUCB). The impact of the design of the core boxes in the manufacturing process is also discussed.

The potential of the simulation in this type of processes is also analysed, namely the possibility of its use to optimize the design of core boxes, especially the location of the vents, aiming the decrease of the specific consumption of raw materials.

A study was also carried out on the software existing in the market that allow the simulation of the filling of core boxes, with the differences between FLOW-3D, QuikCAST and Arena-flow being stressed.

Several simulations were carried out with FLOW-3D and QuikCAST, which were the only available to be used. The results let us conclude that both software did not meet the expectations, although, comparing the two, QuikCAST seems actually to be the most promising.

KEYWORDS

Core box, core manufacturing, simulation software, optimization.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação nunca teria sido possível sem as ideias, amizade, apoio e assistência de inúmeras pessoas e, por isso, gostaria de agradecer a algumas delas.

Em primeiro lugar, à minha família, que me permitiu percorrer este caminho até aqui, dando-me sempre o apoio necessário.

Aos meus amigos, por me acompanharem em todos os momentos, por me ajudarem a esquecer quando as coisas correm mal, e por me darem força para continuar a tentar.

Ao CINFU, por toda a disponibilidade demonstrada durante o decorrer desta dissertação, e pessoalmente ao Eng. Paulo Aguiar.

À SAKTHI Portugal, em especial ao Eng. Marco Cardoso e ao Sr. Secundino, por todo os conhecimentos que me foram transmitidos.

Por último, a todos os docentes do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais e, em particular, ao meu orientador, o Prof. Luís Filipe Malheiros.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| Introdução..... | 1 |
| 1.1. Enquadramento Teórico | 1 |
| 1.2. SAKTHI Portugal | 2 |
| Revisão da Literatura..... | 3 |
| 2.1. Machos | 3 |
| 2.2. Processos de Fabrico de Machos | 3 |
| 2.2.1. Ventilação do Macho | 4 |
| 2.2.2. Fabrico de Machos por Presa com Gás (Caixa Fria)..... | 4 |
| 2.2.2.1. Processo Caixa Fria utilizando Uretano Fenólicos (PUCB) | 5 |
| 2.2.3. Constituintes e Propriedades da Areia a Ser Utilizada | 7 |
| 2.2.4. Utilização de Revestimentos de Machos | 8 |
| 2.3. Caixas de Macho | 8 |
| 2.3.1. Materiais da Caixa de Macho..... | 9 |
| 2.3.1.1. Caixas de Macho Metálicas | 9 |
| 2.3.1.2. Seleção do Tipo de Caixa de Macho | 10 |
| 2.3.2. <i>Design</i> da Caixa de Macho..... | 11 |
| 2.3.3. A Importância dos Respiros nas Caixas de Macho..... | 11 |
| 2.4. Defeitos em Machos..... | 12 |
| 2.4.1. Inspeção de Machos | 13 |
| CAE na Fundição..... | 14 |
| 3.1. Introdução..... | 14 |
| 3.1.1. Computational Fluid Dynamics (CFD)..... | 15 |
| 3.1.1.1. Simulação por Diferenças Finitas (Finite Difference Method - FDM)..... | 16 |
| 3.1.1.2. Simulação por Elementos Finitos (The Finite Element Method – FEM).. | 17 |
| 3.2. <i>Softwares</i> de Simulação do Enchimento de Caixas de Macho..... | 18 |
| 3.2.1. Modelação do Enchimento de uma Caixa de Macho | 20 |
| 3.3. <i>Softwares</i> Disponíveis no Mercado | 21 |
| 3.3.1. FLOW-3D..... | 21 |
| 3.3.1.1. Visão Geral do Modelo de Fluxo Granular Contínuo | 21 |
| 3.3.1.2. Os Respiros em termos do <i>Software</i> | 23 |
| 3.3.1.3. Respiro Global (<i>Global Vent</i>) | 25 |
| 3.4. QuikCAST | 26 |

| | |
|---|----|
| 3.5. Arena-flow..... | 27 |
| 3.5.1. Dinâmica de Fluidos de Partículas Computorizadas (Computational Particle Fluid Dynamics - CPF) | 28 |
| Caso de Estudo..... | 30 |
| 4.1. Macho Utilizado como Caso de Estudo | 30 |
| 4.2. Metodologia Aplicada no FLOW-3D | 31 |
| 4.2.1. Cálculo do Global Vent Coefficient | 32 |
| 4.2.2. Seleção das Condições Iniciais e de Fronteira..... | 34 |
| 4.2.3. Respiros | 34 |
| 4.2.4. <i>Output</i> | 35 |
| 4.2.5. Visualização dos Resultados | 36 |
| 4.3. Metodologia aplicada no QuikCAST | 36 |
| 4.3.1. Visualização dos Resultados | 39 |
| 4.4. Comparação entre Injeções a Diferentes Pressões | 39 |
| 4.5. Comparação entre Resultados de Simulações com Diferentes Pressões de Injeção | |
| 41 | |
| 4.5.1. FLOW-3D | 41 |
| 4.5.2. QuikCAST | 44 |
| 4.6. Comparação entre Simulações com diferentes Respiros em Funcionamento..... | 46 |
| 4.6.1. FLOW-3D | 46 |
| 4.6.2. QuikCAST | 47 |
| 4.7. Simulação do Gaseamento do Macho | 49 |
| 4.8. Comparação entre as potencialidades dos <i>Softwares de Simulação do enchimento de caixas de macho</i> | 52 |
| Conclusões | 56 |
| Considerações Finais..... | 58 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Método de fabrico de machos por presa com gás [2]. | 5 |
| Figura 2 – Análise comparativa do custo por fundido, vs. número de fundidos, para diferentes materiais utilizados no fabrico da caixa de macho [1]. | 10 |
| Figura 3 – Exemplo do malhamento FDM realizado numa esfera utilizando diferentes números de vóxeis [28]. | 16 |
| Figura 4 – Comparação entre o malhamento no método FDM (à esquerda) e FEM (à direita) [28]. | 18 |
| Figura 5 – Camadas de areia coloridas após o enchimento [33]. | 20 |
| Figura 6 – Exemplo de um respiro usado na SAKTHI Portugal. | 24 |
| Figura 7 – Caixa de macho utilizada na produção desta referência e respetivo macho. | 30 |
| Figura 8 – Parâmetros utilizados no modo « <i>Granular Flow in Gas</i> ». | 32 |
| Figura 9 – Parâmetros utilizados na <i>Boundary Condition</i> para a entrada do fluido. | 34 |
| Figura 10 – Propriedades dos respiros no FLOW-3D. | 35 |
| Figura 11 – Condições atribuídas aos volumes do macho e do injetor. | 36 |
| Figura 12 – Condições de pressão selecionadas. | 37 |
| Figura 13 – Condições de <i>Imposed initial Fluid</i> utilizadas. | 37 |
| Figura 14 – Condições de fronteira imposta aos respiros. | 38 |
| Figura 15 – Rugosidade selecionada para a superfície do macho. | 38 |
| Figura 16 - Parâmetros utilizados para a simulação | 39 |
| Figura 17 – Defeitos surgidos no fabrico dos machos para diferentes pressões de injeção: a) 2 Kg/cm ² , b) 4 Kg/cm ² , c) 6 Kg/cm ² . | 40 |
| Figura 18 – Resultados obtidos, com o FLOW-3D, a diferentes pressões de injeção da areia, para uma dimensão de malha de 0,002 m: a) 2 kg/cm ² ; b) 4 kg/cm ² ; c) 2 kg/cm ² . | 42 |
| Figura 19 – Simulação, realizada no FLOW-3D, à pressão de 4 kg/cm ² , para uma dimensão de malha de 0,002 m e um tempo de enchimento de 6 s. | 43 |
| Figura 20 – Resultados obtidos, com o FLOW-3D, a diferentes pressões de injeção da areia, para uma dimensão de malha de 0,003 m: a) 2 kg/cm ² , b) 4 kg/cm ² , c) 6 kg/cm ² . | 44 |
| Figura 21 – Resultados obtidos, com o QuikCAST, a diferentes pressões de injeção da areia, usando todos os respiros: a) 2 kg/cm ² , b) 4 kg/cm ² , c) 6 kg/cm ² . | 45 |
| Figura 22 – Resultados obtidos, com o FLOW-3D, para diferentes configurações de respiros na caixa de macho. | 47 |
| Figura 23 – Configuração de respiros utilizada. | 47 |
| Figura 24 – Resultados obtidos, com o QuikCAST, a diferentes pressões de injeção da areia, usando todos os respiros patentes na Figura 23: a) 2 kg/cm ² , b) 4 kg/cm ² , c) 6 kg/cm ² . | 48 |
| Figura 25 – Resultados obtidos, com o QuikCAST, a diferentes pressões de injeção da areia, na ausência de respiros: a) 2 kg/cm ² , b) 4 kg/cm ² , c) 6 kg/cm ² . | 49 |
| Figura 26 – Configuração da concentração da amina a ser injetada na caixa de macho. | 50 |

Figura 27 - Resultados obtidos, com o FLOW-3D, para o peso específico de amina, na etapa do gaseamento, no caso em que a caixa de macho apresenta todos os respiros (esquerda) e quando são removidos os respiros laterais (direita). 51

Figura 28 – Resultados obtidos, com o FLOW-3D, para o tempo de residência do fluido injetado (amina), na etapa do gaseamento, no caso em que a caixa de macho apresenta todos os respiros (esquerda) e quando são removidos os respiros laterais (direita) 52

Figura 29 – Comparação entre os resultados das simulações com o FLOW-3D e o QuikCAST e os obtidos no fabrico dos machos, a diferentes pressões de injeção da areia: a) 2 kg/cm², b) 4 kg/cm², c) 6 kg/cm². 54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de operação para a produção do macho 31

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento Teórico

A fundição em areia é um dos principais processos para a produção de peças para os mais diversos setores. Para a produção de muitas dessas peças, é necessário o recurso à utilização de machos. O macho é um componente sólido, geralmente formado por areia aglomerada a partir da utilização de uma resina que é endurecida por ação de um catalisador. O macho é introduzido na cavidade de moldação, ficando apoiado sobre os prensos, com o objetivo de gerar as partes ocas dos fundidos [1-4].

Face à necessidade de constante evolução e melhoria dos processos produtivos das fundições, surge a obrigação de minimizar ao máximo o refugo produzido em todos os setores da fábrica e, ao mesmo tempo, aumentar a sua produtividade. Assim, é conseguido o objetivo de reduzir os custos de produção de um determinado componente e, simultaneamente, aumentar a produtividade da fábrica [5].

Sendo a macharia um setor fundamental para assegurar a boa qualidade dos fundidos, é essencial que os machos produzidos sejam, também eles, da melhor qualidade possível. Por outro lado, a produtividade da macharia afeta a produtividade global da fábrica e, por esse motivo, tem de ser a mais elevada possível. Com vista a atingir este objetivo, surgiram recentemente no mercado *softwares* de simulação do enchimento de caixas de macho pela areia de macho, os quais visam simular e prever quais serão as melhores condições para que se consiga obter machos com a melhor qualidade possível e sem defeitos [6, 7].

Assim, o objetivo desta dissertação é explorar os *softwares* de simulação de enchimento de caixas de macho disponíveis no mercado de forma a perceber a sua utilidade como ferramenta de prevenção e deteção de possíveis defeitos em machos fabricados a partir de caixas de macho deficientemente projetadas. Para esse efeito, foram realizadas várias simulações teste sobre um macho produzido pela empresa SAKTHI Portugal. Os *softwares* utilizados foram o FLOW-3D, disponibilizado pelo CINFU, o QuikCAST, existente na FEUP.

.....

1.2. SAKTHI Portugal

A SAKTHI Portugal é uma fundição sediada na Maia que opera com ferro fundido nodular. Possui atualmente cerca de 700 trabalhadores, distribuídos entre as suas três unidades industriais localizadas na Maia, onde se encontra a sua sede; em Águeda, onde está localizada a nova fábrica SP21; e na Trofa, onde se localiza a sua mais recente unidade especializada em maquinação de peças.

A empresa localizada na Maia, encontra-se em funcionamento desde 1972, produzindo anualmente mais de 80000 toneladas de peças que são, essencialmente, exportadas para países como a Alemanha, Espanha, França, e o México. Com uma faturação superior a 100 milhões de euros anuais, a SAKTHI Portugal fabrica componentes de segurança crítica para a indústria automóvel tais como suspensões, travões, ou caixas diferenciais. Entre os seus principais clientes, encontram-se empresas como a BMW, Mercedes, Volvo, Grupo PSA, Mercedes-AMG ou Ford.

O setor da macharia da empresa produz uma parte dos machos necessários para a produção da fundição. O projeto das caixas de macho é desenvolvido na própria empresa, no Departamento de Engenharia do Produto. Os machos são produzidos segundo o sistema de caixa fria utilizando uretanos fenólicos, sendo, sempre que necessário, posteriormente pintados. O setor da macharia possui ainda um setor de serralharia anexo que é responsável pela manutenção e alterações necessárias realizar nas placas molde e nas caixas de macho.

Muitas vezes, após a receção das caixas de macho, a empresa vê-se forçada a realizar várias alterações, com o objetivo de corrigir defeitos que apareçam nos machos produzidos. Assim, a empresa procura agora averiguar a viabilidade de utilizar um *software* de simulação de enchimento de caixas de macho como ferramenta de prevenção e deteção destes defeitos ainda na fase de projeto da respetiva caixa de macho. Deste modo, é pretendido diminuir os custos associados às alterações necessárias efetuar nas caixas de macho e diminuir o tempo despendido para as realizar.

.....

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Machos

Uma das principais vantagens do processo de fundição é a sua capacidade de produzir componentes com cavidades internas complexas. Os componentes que são utilizados para conceber estas cavidades internas no fundido são chamados de machos; estes podem ser feitos a partir de diferentes materiais, em função da sua aplicação. No caso específico da fundição em areia, o material dos machos é, usualmente, areia.

Apesar dos custos associados ao fabrico dos machos, estes são de grande importância na indústria da fundição, pois permitem aumentar a liberdade em termos de geometria das peças fundidas e reduzir a necessidade de maquinar o fundido [1-4].

2.2. Processos de Fabrico de Machos

Os machos são o componente mais sensível da moldação. Além da mistura usualmente utilizada para a sua produção, os machos apresentam muitas vezes revestimentos refratários para evitar o aparecimento de defeitos na superfície do fundido e para assegurar um melhor grau de acabamento dessa superfície.

O processo de fabrico dos machos depende dos materiais utilizados, como por exemplo o ligante e, conseqüentemente, do processo de cura [1]. Os três principais processos utilizados para a produção de machos são:

- presa a frio;
- presa a quente (caixa quente);
- presa por gás (caixa fria).

No processo de presa a frio, a polimerização da resina ocorre à temperatura ambiente, sob a ação de um catalisador líquido. Na presa a quente, a polimerização ocorre por ação do calor. Na presa por gás, a polimerização processa-se à temperatura ambiente sob a ação de um gás que funciona como catalisador [1-4].

A escolha do processo utilizado depende do custo e disponibilidade das matérias-primas necessárias e do número de machos a produzir. Para séries mais pequenas, é geralmente utilizado o processo de presa a frio; por sua vez, para séries maiores, são mais comumente utilizadas técnicas de presa por gás ou presa a quente [1].

Há parâmetros a ter em conta durante o processo de fabrico, nomeadamente o tempo de bancada e o tempo de polimerização. O tempo de bancada é o tempo disponível para o fabrico da moldação (ou macho), previamente à degradação das propriedades mecânicas finais, após a preparação da mistura de areia com o ligante. A vida em bancada da mistura, nos sistemas onde a cura ocorre por ação de um gás ou calor, influencia diretamente a fluidez da areia e, conseqüentemente, a densidade dos machos produzidos.

O tempo de polimerização, ou de cura, é o tempo necessário para que o macho desenvolva resistência suficiente para permitir a sua desmoldação sem ocorrência da sua deformação. Como é óbvio, a fim de aumentar a produtividade, almeja-se que seja o mínimo possível [3].

2.2.1. Ventilação do Macho

Quando se procede ao vazamento do metal para a moldação, ocorre a libertação de alguns gases devido à quebra dos sistemas de ligação, assim como a libertação do ar presente no interior da moldação; assim, é necessário possibilitar o escape desses gases. Um dos fatores determinantes aquando da libertação dos referidos gases é a permeabilidade da areia, uma vez que uma elevada permeabilidade assegura uma ventilação mais natural. Por outro lado, podem ainda ser criadas passagens auxiliares de ventilação que potenciem o escape dos gases. Estas passagens podem ser obtidas por corte, perfuração ou arranhar da superfície, após a cura e antes da montagem dos machos na moldação. No entanto, é necessário ter cuidado redobrado com a localização dessas passagens uma vez que, se estiverem muito próximas da superfície, podem potenciar a penetração de metal. Também pode recorrer-se à inserção de fios de cera ou tubos de plástico nos machos. Estes materiais, durante o vazamento, fundem e são absorvidos pela areia, criando assim uma abertura para a passagem dos gases. Em machos de grandes dimensões, pode preencher-se o seu centro com areia não ligada, escória, ou fragmentos de material inerte com o objetivo de evitar a geração de gases nessa zona [1].

2.2.2. Fabrico de Machos por Presa com Gás (Caixa Fria)

O processo de fabrico de machos por caixa fria consiste na cura, à temperatura ambiente, de uma mistura de areia e ligante, por ação de um gás catalisador que é injetado através da mistura. O ligante e o gás catalisador utilizados podem ser vários: por exemplo, para ligantes de uretano fenólico, pode ser usado como catalisador um gás de trietilamina ou dimetiletetilamina; para ligantes de resina epóxi, é normalmente utilizado dióxido de enxofre; para ligantes de silicato de sódio, é utilizado dióxido de carbono [1].

2.2.2.1. Processo Caixa Fria utilizando Uretano Fenólicos (PUCB)

Este processo utiliza um sistema de ligação à base de três componentes: uma resina fenólica (parte I), um isocianato polimérico (parte II), e um catalisador gasoso de amina terciária (parte III). Inicialmente, a areia é misturada com as partes I e II de forma a revesti-la; posteriormente, esta mistura é inserida na caixa de macho e é compactada à temperatura ambiente. É insuflado o catalisador gasoso de amina terciária na caixa de macho, com o objetivo de promover o endurecimento da mistura de areia. Por fim, é injetado ar na caixa de macho a fim de forçar a amina a atravessar toda a massa de areia e a retirar a amina residual do macho já endurecido (Figura 1) [1, 8-10].

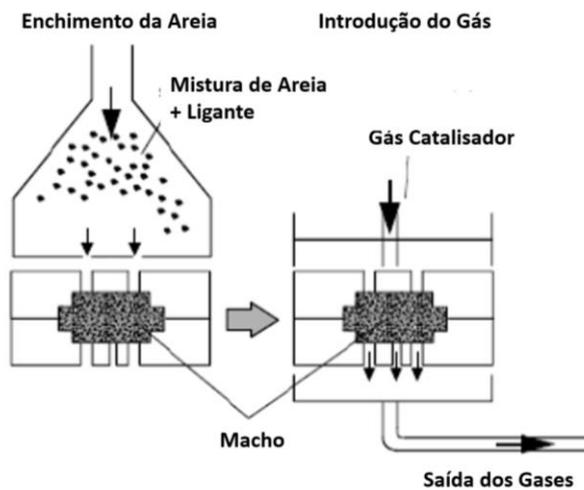


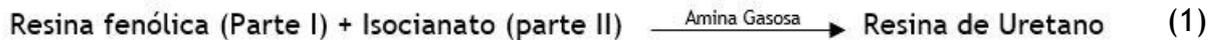
Figura 1 – Método de fabrico de machos por presa com gás [2].

Após a remoção dos gases das caixas de macho, deve promover-se uma lavagem química de forma a remover a amina, evitando assim que esta se disperse no ambiente. Assim sendo, após saírem da caixa de macho, os gases são encaminhados para um depurador químico, onde se procede à remoção da amina através da reação com ácido sulfúrico diluído, daí resultando um sal de sulfato de amina. Em instalações com grandes volumes de produção, o concentrado do depurador é reciclado, através de processamento químico, para o converter novamente em amina, daí advindo vantagens económicas e ambientais [1, 11].

A resina fenólica, antes de ser introduzida no processo, é dissolvida em solventes adequados, com o objetivo de baixar a sua viscosidade e facilitar, assim, o envolvimento da areia por este produto e a posterior mistura com a parte II. Igual procedimento é adotado para o isocianato do segundo componente.

.....

Os grupos hidroxilos, presentes na resina fenólica da parte I, reagem com os grupos de isocianato da parte II, na presença de um catalisador de amina, para formar um composto sólido e duro – a resina de uretano:



Esta reação não produz qualquer subproduto. É este polímero de uretano que promove a ligação entre os grãos de areia e que confere aos machos produzidos pelo processo PUCB (*Phenolic Urethane Cold Box*) propriedades únicas [1, 9, 11].

O processo PUCB pode ser aplicado a todas as areias utilizadas no fabrico dos machos em fundição. Deverão ser tidos em consideração os efeitos da temperatura da areia, a composição química, e o teor de humidade da resina.

A temperatura ideal da areia situa-se na gama 20-25°C. Temperaturas mais baixas podem reduzir a eficiência da mistura e levar ao aumento dos tempos de cura. Por outro lado, temperaturas de areia mais elevadas reduzem os ciclos de gaseificação e a quantidade de catalisador necessário, mas encurtam o tempo de bancada da mistura da areia revestida [1].

À temperatura ambiente, um teor máximo de humidade da areia de 0,2% é aceitável para o processo PUCB; quando a temperatura da areia ultrapassa os 30°C, o teor de humidade deve ser mantido inferior a 0,1% para que o processo funcione corretamente [1, 4].

Concentrações mais elevadas de amina no ar injetado na caixa de macho induzem ciclos de cura mais rápidos e mais facilmente controláveis [1, 4, 11, 12].

Nos pontos seguintes são apresentadas as principais vantagens e inconvenientes relativos ao processo [11].

Vantagens:

- Alta produtividade derivada de uma cura rápida;
- Baixa libertação de gases;
- Utilização de baixas pressões de compactação;
- Processamento da mistura de areia relativamente fácil;
- Elevada resistência mecânica das moldações e machos após a cura;
- Possibilidade de fabricar machos de elevada complexidade;
- Possibilidade de fabricar machos de espessura variável;
- Elevada precisão dimensional;
- Possibilidade de regeneração da areia para o fabrico de moldações;
- Boa colapsabilidade do macho após vazamento do metal.

.....

Desvantagens:

- Sensível à presença de impurezas na areia;
- Necessidade de utilização de sistemas de exaustão e de um ambiente de trabalho arejado;
- Uso de revestimentos e aditivos para a prevenção de ocorrência de possíveis defeitos no fundido;
- Elevado custo das matérias-primas;
- Elevado investimento nos equipamentos utilizados;
- Necessidade de utilização de areia base de elevada qualidade.

2.2.3. Constituintes e Propriedades da Areia a Ser Utilizada

Neste tipo de processo é usualmente utilizada areia misturada com aglomerantes, agentes de cura (amina) e, por vezes, aditivos que aumentem a sua resistência. A areia utilizada é geralmente formada por grãos de forma arredondada, com um teor de sílica superior a 97%, baixo teor de humidade, e uma fração de finos inferior a 1% [1].

Além destas propriedades, existem ainda outros parâmetros que são essenciais ter em conta para que a qualidade dos machos não sofra alterações significativas, nomeadamente: pH da areia; teor de humidade; teor de finos; temperatura de injeção da areia na caixa de machos [1].

A utilização de grãos de areia de forma arredondada é justificada com o facto de que a existência de formas angulares aumenta a superfície específica, incrementando significativamente o consumo de ligante, para além de fomentar a propagação de potenciais fissuras no macho [8].

De modo a resistir à turbulência causada pelo enchimento, solidificação e arrefecimento do ferro introduzido na moldação é importante que a mistura de areia e resina apresente uma resistência mecânica e refratariedade suficientes [13].

A areia mais utilizada no setor da macharia, como já foi dito, é a areia de sílica. Esta deve possuir uma granulometria – recomendada para a indústria automóvel – no intervalo de 50 a 75, em termos do índice de finura AFS (American Foundry Society), com o objetivo de homogeneizar a mistura, melhorar a permeabilidade e a fluidez, e permitir a diminuição do tempo de gasificação aquando do processo de enchimento da caixa de macho pela mistura de areia e ligante [3].

A utilização de diâmetros de grãos de areia inferiores, assim como de areia mais angulosa promove o aumento da superfície específica da mesma. Desta forma, o consumo de resina é necessariamente incrementado, o que leva ao aumento do tempo de cura do macho e da quantidade de catalisador que é necessário utilizar no processo [4].

2.2.4. Utilização de Revestimentos de Machos

Muitas vezes, após o fabrico do macho, é aplicado um revestimento sobre o mesmo. Este revestimento tem como objetivo aumentar a qualidade do acabamento superficial da peça, a redução da reação entre o macho e o metal, e a diminuição ou eliminação de possíveis penetrações do metal na areia. Assim, consegue-se uma redução do tempo de maquinagem necessário para uma determinada peça, bem como do desgaste dos equipamentos utilizados nessa operação. O revestimento pode ainda melhorar a qualidade superficial do fundido e facilitar o abate do macho após vazamento. Por fim, estes revestimentos promovem um aumento da taxa de arrefecimento da peça [1, 4].

Os materiais utilizados para este fim são materiais refratários que podem ser aplicados por pulverização ou por imersão [4].

As tintas utilizadas para a pintura de machos são desenvolvidas de modo a serem altamente resistentes às altas temperaturas a que irão estar sujeitas quando estiverem em contacto com o metal líquido, e de modo a que atuem como barreira entre este e o macho. Deste modo, consegue-se evitar problemas de penetração de metal no macho, a diminuição do efeito *burn-on*, e a erosão sofrida pelo macho quando em contacto com o metal líquido [14].

Para que esta barreira seja eficaz é necessário que esta apresente uma maior refratariedade do que o próprio macho. No entanto, é ainda essencial que esta possua outras características, tais como: um tempo de secagem curto para evitar tempos de armazenamento demasiado elevados; uma viscosidade suficiente para evitar a ocorrência de escorrimo ou heterogeneidade na distribuição da tinta na zona pintada [14].

No entanto, devido ao aumento do tempo de fabrico do macho e ao aumento do custo do mesmo devido à utilização deste método, o ideal seria conseguir-se, tanto quanto possível, o aumento da qualidade da superfície do macho por outra via que não obrigasse à incorporação de mais uma etapa no processo.

2.3. Caixas de Macho

As caixas de macho são os reversos geométricos dos machos e servem para fabricar os mesmos. Muitas vezes, uma única peça pode necessitar de mais do que um macho e, consequentemente, mais do que uma caixa de macho. Por este motivo, o custo do fabrico das caixas de macho pode exceder o custo do próprio molde da peça final. Atendendo a que o fabrico de machos necessita de um gás catalisador para o processo de cura do ligante da areia, é necessário ter em especial atenção o *design* da ventilação e a localização de filtros de escape de gases na caixa de macho. Além disso, é ainda necessário utilizar pinos de ejeção para auxiliar a remoção do macho da caixa [15-18].

O tipo de caixa de macho e o material utilizado no seu fabrico podem variar. A construção da caixa depende do processo de fabrico de machos utilizado e do número de

machos a produzir. Devido ao facto de a injeção da areia na caixa de macho ser feita a alta pressão, estas estão sujeitas a um desgaste elevado [1, 11, 16].

2.3.1. Materiais da Caixa de Macho

Para o fabrico de caixas de macho podem ser utilizados diferentes materiais. O material utilizado influencia as características físicas da caixa, as técnicas a utilizar para o seu fabrico e reparação, e as aplicações para as quais as caixas mais se adequam. Na seleção do material a utilizar, deve ter-se em conta o número de machos a produzir, a precisão dimensional necessária, o processo de fabrico de machos utilizado, e as dimensões e forma dos mesmos. Muitas vezes, para melhorar o desempenho e durabilidade das caixas de machos, são utilizados diferentes materiais na mesma caixa [16].

2.3.1.1. Caixas de Macho Metálicas

A utilização de caixas de macho metálicas é particularmente apropriada para produções em série. Comparando com as caixas em madeira, as caixas metálicas são muito mais caras; no entanto, são muito mais resistentes à abrasão e mais estáveis, a nível dimensional, relativamente a alterações de humidade. São, por isso, geralmente utilizadas em equipamentos automáticos, que funcionam com elevada pressão, para se obterem elevadas tolerâncias dimensionais, e para se produzirem grandes séries [1].

No fabrico das caixas metálicas são normalmente utilizadas ligas de alumínio, ferro fundido, ou aço. Quando o processo envolve o aquecimento do sistema, utiliza-se por norma aço ou ferro fundido, pois o alumínio tem tendência a sofrer maior desgaste a temperaturas elevadas. A escolha do metal a utilizar depende, mais uma vez, da resistência ao desgaste necessária, da estabilidade dimensional pretendida, da maquinabilidade do material, e da capacidade de produzir um macho com bom acabamento superficial [1].

As caixas metálicas podem ser fabricadas através de fundição por cera perdida em gesso; por fundição em areia, utilizando moldes feitos em madeira; ou por maquinagem de um bloco metálico [1].

Quando as caixas de macho são produzidas por fundição, é necessário ainda proceder-se a etapas de maquinagem e de polimento para que a superfície obtida seja lisa e livre de imperfeições. Estas operações de acabamento podem envolver mais de 50% do tempo necessário para o seu fabrico [1, 3, 15, 16].

No caso de a caixa ser produzida por fundição por cera perdida, com precisões dimensionais de $\pm 0,001$ mm, obtém-se uma peça fundida com boa qualidade superficial, necessitando assim de menos tempo para processos de acabamento. Ainda assim, são necessárias algumas operações de maquinagem e de polimento final. No caso do alumínio, são geralmente utilizadas técnicas de vazamento sob pressão para encurtar as operações de acabamento subsequentes [1].

As caixas de macho podem ainda ser produzidas diretamente a partir de um bloco metálico, sem necessidade de desenvolver as etapas intermédias envolvidas nos processos

de fundição, nomeadamente a necessidade de fabricar um molde. Assim, o recurso a técnicas de maquinagem por controlo numérico computadorizado (CNC) de um bloco metálico é a prática com maior relevância no fabrico de caixas de macho, produzindo de uma só vez uma peça com boa qualidade superficial e sem necessidade de introduzir outras etapas no processo [1].

A resistência ao desgaste das caixas de macho pode ainda ser aumentada com recurso a revestimentos resistentes à abrasão. Por vezes, são ainda utilizados insertos de poliuretano colados em locais sujeitos a elevado desgaste [1, 11, 15].

2.3.1.2. Seleção do Tipo de Caixa de Macho

O tipo de caixa de macho utilizada depende:

- do número de machos a produzir;
- do processo utilizado para o fabrico de machos;
- do *design* do macho;
- das tolerâncias dimensionais exigidas.

O preço e tempo de vida da caixa variam consideravelmente conforme o material e o equipamento utilizados (Figura 2). Por exemplo, uma caixa de macho em madeira apenas pode ser utilizada para uma produção muito limitada antes de exigir reparação ou substituição. No entanto, se for utilizado um aço, a vida útil dessa mesma caixa aumentará substancialmente [1].

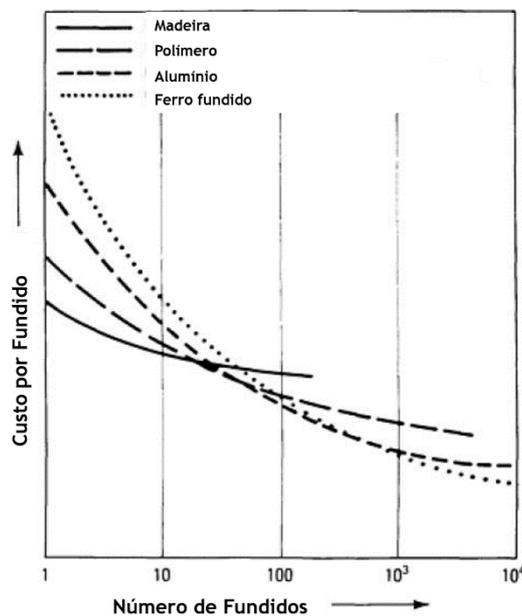


Figura 2 – Análise comparativa do custo por fundido, vs. número de fundidos, para diferentes materiais utilizados no fabrico da caixa de macho [1].

2.3.2. Design da Caixa de Macho

O *design* da caixa de macho é, logo a seguir à seleção do material, o aspeto mais importante a ter em conta para o bom desempenho da mesma [16].

Relativamente à abertura por onde se faz a injeção da areia, esta deve encontrar-se na parte superior da caixa de macho e ser tão grande quanto possível e tão pequena quanto necessário. Uma abertura maior permite que a areia seja injetada a pressões mais baixas e que o tempo necessário para a sua injeção seja inferior. As dimensões dessa abertura dependerá fortemente do próprio *design* do macho [11, 19].

Além da abertura para a entrada de areia, é ainda necessário que a caixa de macho tenha outras aberturas, mais pequenas, no topo da caixa de macho para que, quando ocorre a injeção da areia, o ar, que se encontra no seu interior, possa escapar. Efetivamente, durante o processo de enchimento da caixa de macho, é injetada areia para o seu interior recorrendo a ar a elevada pressão, que promove a fluidização da areia, daí resultando um fluido que consiste numa mistura de ar/areia/ligante. Ao ser injetado para o interior da caixa de macho, este fluido empurra o ar que se encontra no interior da caixa para fora da mesma, através dos respiros existentes. O objetivo é obter uma distribuição de densidade da areia na caixa de macho a mais elevada e tão uniforme quanto possível. Para que este processo seja otimizado, podem variar-se alguns parâmetros, tais como a pressão utilizada na injeção da areia, o número e localização dos orifícios de injeção, e a ventilação da caixa de macho [11, 19].

Entretanto, no processo de caixa fria, devemos ter em conta que iremos introduzir dentro da caixa de macho um catalisador gasoso. Assim, se houver muitos orifícios na caixa de macho, o catalisador irá escapar através dos mesmos e a cura do macho não será feita de forma conveniente. Por este motivo, é necessário estabelecer um compromisso entre o número de aberturas, a compactação do macho, e a quantidade de catalisador consumido [11, 19].

É ainda necessário ter em consideração o posicionamento das entradas de gás. Se as entradas de gás não se encontrarem convenientemente posicionadas, a areia pode não ser toda percorrida pelo mesmo, levando a que a cura não ocorra em certas zonas. Assim, um arranjo ideal da localização destas entradas permite que a cura do macho ocorra no menor tempo possível e em todo o seu volume [11, 16, 19].

A fim de não comprometer a remoção do macho da caixa, é necessário que esta não apresente contrassaídas. Além disso, as cavidades mais profundas da caixa de macho devem apresentar um ângulo de saída adequado para que seja minimizada a erosão do macho, devido ao atrito, durante a sua remoção [16].

2.3.3. A Importância dos Respiros nas Caixas de Macho

A cura do ligante da areia inicia-se quando o gás catalisador é injetado na caixa de macho através dos sopradores. Esse gás, tal como referido, escapa-se através dos respiros existentes na caixa de macho. Esta injeção do catalisador deve ser suficientemente longa

para que o gás alcance todas as partes do macho a fim de garantir o endurecimento em todo o seu volume. Por outro lado, não deve ser mais longa do que o estritamente necessário, com o objetivo de minimizar o consumo de gás e o tempo necessário para o fabrico de um determinado macho.

A qualidade do macho produzido é afetada pelos parâmetros do processo, pelas propriedades da areia, e pelo *design* da caixa de macho, onde a localização dos respiros apresenta especial relevância [20, 21]. Apesar deste facto, nos últimos anos a investigação tem incidido muito mais sobre o tipo de ligantes utilizados no processo, havendo por isso poucos estudos sobre este assunto. Ainda assim, estudos apontam para a influência da distribuição dos respiros nas diferenças de pressão nas diversas zonas da caixa de macho. Estas diferenças de pressão são determinantes na fluidez dos grãos de areia, influenciando assim, significativamente, o enchimento da caixa de macho, sendo ainda importantes para que o catalisador consiga chegar a todas as zonas do macho antes de escapar-se pelos respiros existentes [19, 22, 23].

2.4. Defeitos em Machos

Tal como referido anteriormente, os machos são um componente extremamente importante para a obtenção de um fundido de elevada qualidade e sem defeitos [1, 12, 21]. Assim, é igualmente importante que os machos produzidos não possuam qualquer defeito [12, 20, 21, 24]. Entre os defeitos mais comuns, destacam-se:

- dureza insuficiente dos machos: este defeito ocorre normalmente devido à utilização de pouca quantidade de resina ou devido ao tempo de vida da resina ter sido ultrapassado durante a mistura da areia. Este defeito afeta a resistência do macho, podendo levar a que este não aguente a pressão metalostática durante o vazamento;
- ocorrência de fissuras nos machos: as fissuras podem ocorrer devido ao movimento da placa deslizante ou ao deficiente paralelismo da placa da caixa de macho, ou ainda ser geradas durante a remoção do macho da respetiva caixa. Este tipo de defeito afeta obviamente a resistência dos machos produzidos;
- machos não curados: ocorre quando os respiros da caixa de macho são em número excessivo ou estão mal localizados, ou quando a pressão de entrada do gás é demasiado baixa, ou ainda quando a vedação da entrada do gás está danificada;
- machos esponjosos: deve-se à utilização de pressões de injeção da areia demasiado baixas ou ao facto de a vedação, na zona de entrada da areia, ser deficiente, o que leva a que o macho não apresente resistência suficiente para ser utilizado;
- machos incompletos: acontece quando a entrada da areia fica obstruída ou não existe areia suficiente para o seu fabrico;
- deficiente qualidade da superfície dos machos: pode dever-se à falta de limpeza dos machos, à viscosidade da tinta aplicada, ou à granulometria da areia utilizada.

Assim, o mau acabamento superficial, a baixa resistência do macho, ou a compactação insuficiente da areia, são os defeitos típicos que ocorrem em machos e são responsáveis por grande parte da taxa de refugo numa fundição [1, 13, 17]. Deste modo, a disponibilidade de soluções de simulação numérica, a ser abordada posteriormente neste trabalho, pode permitir simular diferentes parâmetros do processo. Caso os resultados sejam de elevada confiabilidade pode ser permitido obter-se uma otimização do processo, de forma confiável e rentável, visando a obtenção de machos de maior qualidade [20, 21, 24].

2.4.1. Inspeção de Machos

Para garantir a qualidade dos machos produzidos, as empresas adotam diversos procedimentos de inspeção [21].

O primeiro, trata-se de realizar ensaios à caixa de macho cada vez que esta volta à produção. Estes ensaios visam confirmar o bom estado da caixa de macho e garantir que esta produz machos de qualidade. Estes ensaios são ainda utilizados, como já foi referido, para afinar as variáveis que são necessárias controlar no processo [1, 12, 21].

No caso de o macho ser retirado da caixa de macho e pintado de forma manual, é ainda realizada a inspeção visual, a todos os machos, pelo operador responsável por estas operações, procurando, deste modo, detetar qualquer tipo de defeito na superfície do mesmo. Os machos voltam ainda a ser inspecionados pelo operador que, posteriormente, os coloca na moldação [1, 12, 21].

São ainda realizados ensaios de dureza a uma amostra dos machos produzidos, com o objetivo de garantir que estes estão a ser produzidos com a resistência mecânica necessária. Por vezes, para estudos mais precisos, podem também ser realizados ensaios de flexão [1, 12, 21].

A tinta utilizada para revestir os machos é também avaliada com base na sua viscosidade, de forma a não comprometer a qualidade do acabamento superficial do macho [1, 12, 21].

CAPÍTULO 3

CAE NA FUNDIÇÃO

3.1. Introdução

Desde o início dos anos 70 que a simulação tem sido utilizada pelas grandes empresas de fundição para prever defeitos e possíveis erros no processo de fabrico de determinadas peças. Desde então, a capacidade e a velocidade das simulações realizadas têm crescido muito, ao ponto de, hoje em dia, quase todos os detalhes de um processo de fundição poderem ser simulados antecipadamente. A partir de *softwares* que permitem a simulação, as variáveis do processo podem ser sistematicamente ajustadas sem necessidade de produzir protótipos caros e de realizar produções desnecessárias ou com interrupções, havendo assim um maior rendimento e eficiência no desenvolvimento e implantação de novos produtos [25].

Além disso, estima-se que cerca de 90% dos defeitos nos componentes fabricados sejam devidos a erros cometidos no projeto. Os custos são também eles reduzidos, visto que, para realizar uma alteração num determinado projeto, é necessário gastar 10 vezes mais no passo seguinte, do que se se corrigir logo um determinado problema no projeto. Assim, todos os métodos e ferramentas necessárias à produção de um determinado produto afetarão significativamente os custos totais de fabricação do mesmo [26].

O aumento da exigência no *design* das peças produzidas e da sua qualidade levou a que os fabricantes e os projetistas se vissem obrigados a recorrer a este tipo de ferramenta [26].

O planeamento e o *design* consistente de ferramentas para fundição exigem conhecimento dos processos e experiência. Com recurso aos *softwares* de simulação, passou a ser possível a realização de diversas experiências em apenas um dia, ao contrário do que seria necessário anteriormente [26].

O resultado de simulações tem como maior vantagem o facto de serem fáceis de interpretar. A indústria deixou assim para trás os antigos métodos – caros e morosos – de tentativa e erro, com recurso à elaboração de protótipos físicos. Sendo a fundição um processo onde não é possível olhar facilmente para dentro do que está a acontecer, o uso de simulação permite, aos trabalhadores desta área, entender melhor os processos envolvidos na mesma [26].

Desta forma, é possível prever defeitos mesmo antes do início da construção de um molde [26].

Assim, a modernização é a única chave para melhorar a qualidade e a produtividade da indústria de fundição, levando ainda a um aumento do envolvimento pessoal e criatividade dos projetistas [26].

No entanto, na área da macharia de uma fundição, a simulação ainda é uma ferramenta muito pouco utilizada. Isto deve-se ao facto de esta ser uma funcionalidade recente dos *softwares* de simulação e de, além disso, este ser um setor onde não é dada grande relevância e onde existe bastante inércia, por parte da administração, de fazer investimentos. Ainda assim, com o contínuo aumento da exigência nos artigos produzidos, e com a produção de fundidos já bastante otimizada, as empresas viram-se agora para a melhoria e otimização dos processos auxiliares na fundição [25].

Foi neste contexto que surgiu o tema desta dissertação, que tem como objetivo explorar os *softwares* existentes no mercado, que possibilitam a simulação do processo de enchimento de uma caixa de macho, no caso específico, do processo de caixa fria utilizando uretanos fenólicos.

3.1.1. *Computational Fluid Dynamics (CFD)*

A Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) é um ramo da Dinâmica de Fluidos que permite simular fluxos de fluidos reais através de uma solução numérica de equações governantes. As equações que governam a dinâmica de fluidos newtonianas, equações de Navier-Stokes, são conhecidas há mais de 150 anos. Assim, nos dias de hoje, existe um grande número de ferramentas de CFD disponíveis no mercado devido à sua enorme utilidade como ferramenta de análise e de *design*. Estas técnicas ganharam uma enorme importância com o surgimento dos computadores digitais. Desde então, um grande número de métodos numéricos foi desenvolvido para resolver problemas de fluxos usando este tipo de abordagem. O objetivo deste tipo de simulação é descobrir como é que um determinado fluxo se comporta num dado sistema, para um dado conjunto de condições de entrada e de saída. O conceito básico dos métodos de CFD é conseguir encontrar os valores das grandezas dos fluxos num grande número de pontos do sistema, pontos estes que são geralmente ligados no que é chamado de malha. O sistema converte o resultado das equações usando um procedimento num sistema algébrico de equações que representam a interdependência do fluxo nesses pontos e nos pontos vizinhos. Com o desenvolvimento tecnológico, que tornou as aquisições numéricas mais rápidas, e com o contínuo aumento da velocidade dos computadores e disponibilidade de memória, problemas cada vez maiores vão sendo resolvidos com recurso a este método, com um custo menor e tempos de resposta mais rápidos. Assim, na maioria das aplicações ligadas ao *design* e à análise de ferramentas, os métodos de CFD têm vindo a substituir os métodos analíticos tradicionais [27].

Também a fundição tem vindo a interligar o seu conhecimento com este método, existindo, atualmente, diversas ferramentas de simulação disponíveis no mercado para simulação de processos ligados à área da fundição. Os *softwares* de simulação existentes hoje em dia, ligados à fundição, inserem-se essencialmente em dois grandes métodos:

simulação por diferenças finitas (FDM – *Finite Difference Method*), e simulação por elementos finitos (FEM – *Finite Element Method*) [27].

3.1.1.1. Simulação por Diferenças Finitas (*Finite Difference Method – FDM*)

O FDM é o método mais simples de aplicar, particularmente em malhas uniformes. No entanto, este método, requer um elevado grau de regularidade da malha. A malha precisa de ser configurada de maneira estruturada, onde os pontos da malha devem estar localizados nos pontos de interseção das famílias de curvas retilíneas. Assim, o malhamento nesta técnica consiste na divisão do espaço 3D em cubos («vóxeis») todos eles da mesma dimensão (Figura 3). A simulação resume-se a uma iteração sucessiva da transferência de uma determinada propriedade entre cubos vizinhos [28].

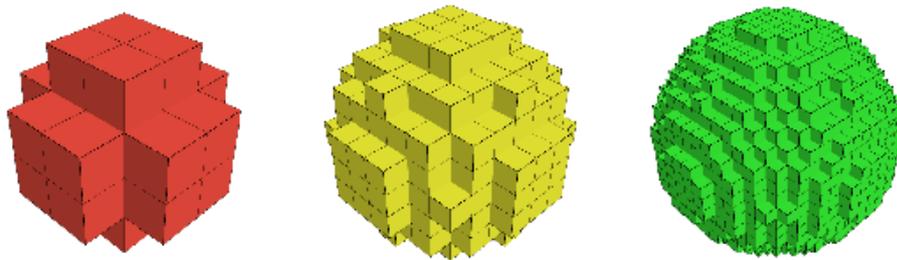


Figura 3 – Exemplo do malhamento FDM realizado numa esfera utilizando diferentes números de vóxeis [28].

No método por diferenças finitas, a discretização (a divisão do todo em partes menores) baseia-se na resolução de equações diferenciais parciais. Cada derivada é então substituída por uma fórmula de diferença aproximada, obtida, geralmente, através da série de Taylor [29].

Este método é difícil de usar quando confrontado com geometrias complexas. Por esta razão, este método é limitado a aplicações práticas e apenas um número muito reduzido de *softwares* de engenharia dependem dele [29, 30].

No entanto, a simplicidade deste método permite explorar as propriedades de várias discretizações numéricas e comparar os diferentes graus de precisão. Além disso, permite ainda uma compreensão melhorada dos procedimentos numéricos. Para procedimentos que exijam derivadas de ordem superior, ou que necessitem de elevada precisão, este método pode apresentar vantagens, apesar da sua limitação na regularidade da malha [29].

As principais vantagens deste método são:

- malhamento rápido e automático;
- utilização de algoritmos simples na simulação iterativa;
- existência de *softwares* baratos.

As principais desvantagens deste método são:

- baixa resolução geométrica;
- necessidade de aumentar exponencialmente o número de diferenças finitas para se conseguir um maior detalhe;
- não permitir simular propriedade vetorizadas.

3.1.1.2. Simulação por Elementos Finitos (*The Finite Element Method — FEM*)

O FEM é baseado num método matemático que permite resolver equações diferenciais parciais ordinárias e elípticas, através de um esquema de interpolação polinomial por partes, que foi desenvolvido entre 1940 e 1960, principalmente para problemas de Dinâmica Estrutural. Mais tarde, este método foi adaptado para o campo da Dinâmica de Fluidos [31].

Relativamente ao FDM, este método apresenta como grande vantagem o facto de permitir lidar com geometrias bastante mais complexas, pois admite o uso de malhas irregulares e de diferentes formas em duas e três dimensões (triângulos, quadriláteros, tetraedros, hexaedros, pentaedros, prismas, etc.). Além disso, fornece um conjunto de funções que dão a variação das equações diferenciais entre os pontos da malha, enquanto que o FDM apenas fornece informações para os valores nos pontos da malha [28].

No FEM, a geometria do objeto em estudo é dividida num número discreto de pequenos corpos com um formato específico, denominados de elementos finitos, que são interconectados por pontos comuns, denominados de nós. A discretização, o equacionamento, e o cálculo são adequados para a programação e posterior tratamento em computadores. Assim, este método, ao dividir uma geometria complexa em elementos finitos, permite resolver um problema complexo, subdividindo-o em vários problemas mais simples, o que possibilita ao computador realizar a sua tarefa com maior eficiência [31].

O FEM usa malhas computacionais montadas no corpo, levando a uma representação mais precisa da interface metal/molde (moldação) em comparação com o FDM (Figura 4). O FEM tem a capacidade de lidar com geometrias (e limites) com relativa facilidade. No entanto, requer maior memória computacional, mais recursos para cálculos, sendo necessária a intervenção manual, e essencial o uso de geradores especiais para a construção das malhas 3D. Por outro lado, o FDM oferece uma maior facilidade na geração de malha devido à natureza estruturada da malha e ao uso de menos recursos de memória em comparação com o FEM. No entanto, o FDM geralmente requer malhas finas para descrever geometrias para reduzir erros associados à representação «degrau-degrau» das fronteiras curvas [28].

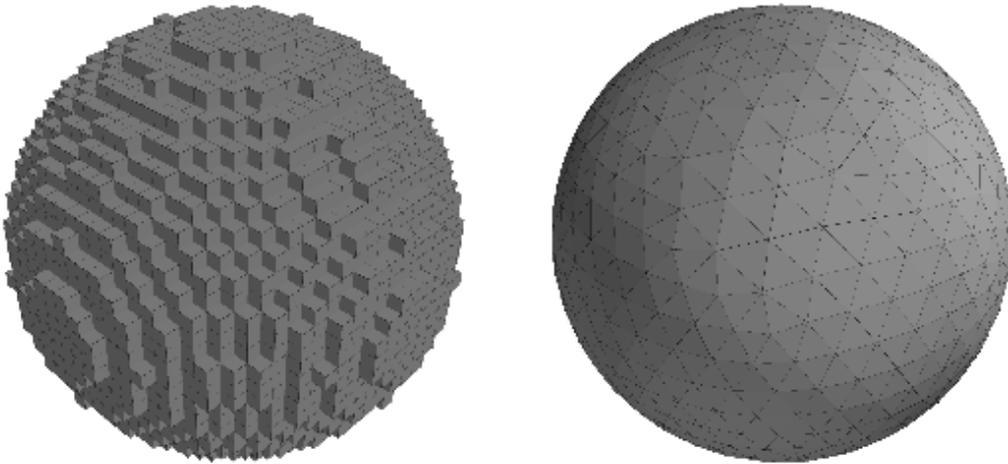


Figura 4 – Comparação entre o malhamento no método FDM (à esquerda) e FEM (à direita) [28].

As principais vantagens deste método são:

- boa definição geométrica;
- possibilidade de ter uma dimensão de malha variável, adaptando-se ao erro cordal;
- permite simular propriedades vetorizadas (e. g., força).

As principais desvantagens são:

- malhamento complexo e demorado;
- simulação complexa;
- necessidade de pré- e pós-processamento separados.

Softwares como o *ProCAST*, *QuikCAST*, *SOLIDCast*, *FLOWCast* são regidos por técnicas FEM. Por sua vez, o *MAGMASOFT*, *CastCAE* e *FLOW-3D* são regidos por métodos FDM. Outros *softwares*, como o *Arena-flow*, permitem usar outros métodos além dos comumente utilizados [32].

3.2. Softwares de Simulação do Enchimento de Caixas de Macho

A possibilidade de utilizar *softwares* de simulação, para prever o comportamento da areia e a qualidade do macho obtido em processos de macharia, é relativamente recente. A utilização deste tipo de ferramenta não só permite aumentar a compreensão dos processos envolvidos durante o fabrico de um macho, como também aumentar a qualidade das peças fundidas [5, 6, 20, 33, 34].

Os defeitos de fundição causados pelos machos têm um impacto relevante sobre o custo final de produção de uma determinada peça [21], não só devido à quantidade de refugo daí resultante, mas também devido ao custo do trabalho adicional que pode ser necessário executar para corrigir os defeitos causados. Atualmente, o projeto de uma caixa de macho é desenvolvido com base no *know-how* do projetista, através de métodos de tentativa e erro, até que seja atingida a qualidade exigida para o projeto em causa. Assim, o desenvolvimento de uma nova caixa de macho requer vários ciclos de otimização, incluindo ensaios de produção reais, sob diversas condições, que acarretam um aumento do custo do projeto e do tempo necessário despendido até se atingir a qualidade final pretendida. Cada um destes ensaios induz mudanças mais ou menos profundas do equipamento, sem que o projetista tenha a certeza de que as alterações implementadas levarão ao sucesso desejado. Após as alterações, apenas é possível observar o resultado obtido, não sendo por isso possível estabelecer um princípio claro de causa e efeito que possa explicar tal resultado [20, 34]. Além destes fatores, as crescentes exigências relativas à qualidade dos fundidos, com secções cada vez mais finas, fazem com que a produção de machos mais complexos e de alta qualidade se torne uma obrigação para a indústria da fundição [19].

Apesar de a simulação de processos de fundição já ser utilizada há mais de 20 anos, apenas agora surgem *softwares* de simulação para a produção de machos. Estes novos *softwares* vêm permitir que se avance mais depressa no *design* das ferramentas necessárias para o processo. As interações complexas que ocorrem durante o transporte e compactação da mistura de areia + ligante numa caixa de macho, ou durante o processo da sua gaseificação, endurecimento e secagem do macho, são difíceis de avaliar por um técnico, por mais experiente que seja. No entanto, a simulação do processo, com o auxílio de um *software* próprio, permite que os fatores importantes que afetam a qualidade do macho sejam devidamente ajustados antes de se avançar para o fabrico da respetiva caixa e produção em série. Torna-se assim possível descortinar toda a sequência do processo e os parâmetros físicos mais relevantes, e realizar uma abordagem direcionada com base em interações físicas e factos claros que levam a que a viabilidade técnica e económica do fabrico dos machos seja avaliada. Deste modo, a compreensão dos processos envolvidos é aprofundada e a implementação de medidas de melhoria da qualidade dos machos é simplificada, daí advindo um aumento da eficiência do *design* da ferramenta [5].

Diversos fatores influenciam o desempenho do processo de fabrico do macho, tais como: o volume da caixa de macho, a área do canal de injeção da areia, a taxa de aumento de pressão de injeção, as dimensões e distribuição dos orifícios de ventilação, e a pressão do ar injetado [19].

Os principais fatores que determinam o processo de enchimento da caixa de macho pela mistura de areia e ar são o débito de fase sólida e a pressão de injeção do fluxo bifásico areia/ar. Outros fatores que podem também interferir no enchimento são a densidade do fluxo bifásico e a velocidade média de ambas as fases [15, 24, 35, 36].

De acordo com R. Danko [19], a velocidade do fluxo areia/ar, assim como a intensidade do fluxo de areia a entrar na caixa de macho, dependem da pressão de injeção e

do diâmetro da abertura por onde a areia entra. Além disso, afirma que o processo de enchimento de caixas de macho, de formato mais simples, pode ser dividido em três fases: a primeira fase consiste no enchimento total do fundo da caixa de macho com areia compactada; a segunda fase compreende o enchimento total da caixa e, por último, a terceira fase assume a consolidação da areia junto da abertura de entrada da mesma. Porém, quando o formato do macho é mais complexo, onde o fluxo é obrigado a mudar de direção, podem ocorrer variações de densidade de compactação em diversas zonas do macho.

3.2.1. Modelação do Enchimento de uma Caixa de Macho

A modelação do processo de enchimento de uma caixa de macho constitui um grande desafio pois necessita de representar adequadamente os comportamentos do fluxo dinâmico do ar, da areia, e do ligante, dentro do mesmo processo [34]. O comportamento do fluxo de uma mistura de um sólido granular e gás é bastante diferente do fluxo de um líquido e, por esse motivo, os modelos físico-matemáticos necessários para simular o processo de enchimento de uma caixa de macho são bastante diferentes daqueles que são utilizados para simular o vazamento de um metal [10, 37, 38]. Isto deve-se ao facto de a areia, quando é introduzida dentro da cavidade da caixa de macho, não se misturar, como acontece com um líquido, pelo que as várias camadas de cores estão claramente separadas e na mesma ordem em que foram posicionados no injetor (Figura 5).

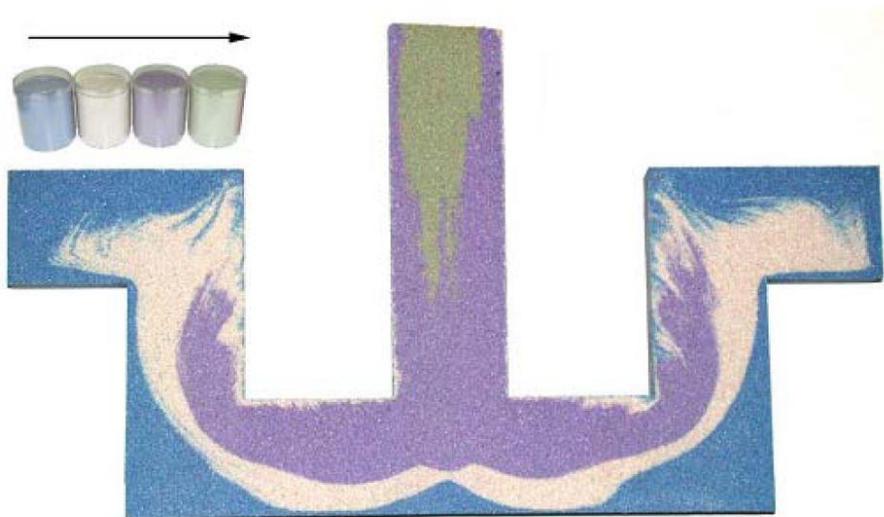


Figura 5 – Camadas de areia coloridas após o enchimento [33].

3.3. Softwares Disponíveis no Mercado

Existem diferentes *softwares* no mercado que possibilitam a simulação do enchimento de caixas de machos. Alguns deles são módulos de *softwares* de simulação de vazamento de metais que possibilitam a simulação nesta área como, por exemplo, o *MAGMA C+M*, o *FLOW-3D*, ou o *QuikCAST*; outros são *softwares* inteiramente dedicados à simulação do enchimento com areia como, por exemplo, o *Arena-flow*.

3.3.1. FLOW-3D

O FLOW-3D utiliza um modelo contínuo para a previsão computacional da dinâmica de um material granular. Este modelo utiliza a designação de fluxo granular concentrado para um material granular cuja fração volúmica de grãos seja superior a 50%. Como este modelo se baseia numa representação fluida contínua de um sólido granular, não fazendo nenhuma tentativa de tratar as partículas granulares de forma individual, este modelo é chamado de contínuo. Assim, o *software* FLOW-3D modificou e aprimorou diversos recursos pré-existentes no programa para que fosse possível fazer a simulação de um fluxo granular [39, 40].

3.3.1.1. Visão Geral do Modelo de Fluxo Granular Contínuo

Uma mistura de areia e ar, envolta por ar, é um fluxo bifásico no qual o ar e a areia fluem a velocidades distintas; no entanto, estas duas fases são acopladas através de trocas de momento resultantes de pressões. Nas areias mais utilizadas no fabrico de machos, os diâmetros das partículas de areia são da ordem das décimas de milímetro, e a fração volúmica da areia que é soprada para uma caixa de macho é geralmente de 50% a 60%. Neste intervalo, existe uma forte ligação entre a areia e o ar. Assim, esta mistura pode ser modelada como um fluido, assumindo uma velocidade relativa entre a velocidade do ar e a velocidade da areia [41].

Deste modo, este modelo assume que a mistura areia/ar pode ser representada por um único fluido, com uma superfície livre e nítida na interface com o ar. No entanto, é permitido que o fluido composto apresente uma densidade não uniforme [40].

A densidade de um elemento fluido da mistura não pode mudar com o fluxo da mistura devido à suposição de incompressibilidade. No entanto, variações de densidade podem desenvolver-se devido ao fluxo relativo entre o ar e a areia dentro da própria mistura. Este fluxo relativo, também considerado incompressível, é modelado usando uma aproximação de fluxo de deriva (*drift flux model*), que é baseada em gradientes de pressão e tensões viscosas atuando sobre grãos de areia individuais (com um ajuste empírico feito para múltiplas interações de partículas) [42].

Com o modelo de fluxo de deriva é contabilizado o acondicionamento de areia, mas é necessário um mecanismo adicional para remover o ar deslocado quando a areia é compactada. Como a mistura inicial ar/areia é tratada como incompressível, se a areia estiver compactada, o volume final da mistura deverá ser inferior ao inicial. No modelo atual,

essa diminuição de volume da mistura é tratada como uma perda de ar na superfície livre da mistura. O critério básico para definir uma superfície livre é que a fração volúmica de areia deve ser maior ou igual a 50%. Se a fração volúmica for inferior a 50%, o ar é removido e a localização da superfície livre é ajustada para retornar a mistura a 50% de sólido. O ar removido é transferido para a bolha de ar adjacente [39, 40].

Misturas de areia/ar, injetadas numa caixa de macho, são dominadas pela massa da areia. Por essa razão, ao usar um modelo para um fluxo de superfície livre de um fluido, é importante definir a densidade da mistura como a densidade da areia. A densidade utilizada para material disperso na mistura é a densidade do ar. Assim, é a areia que é dispersa porque são os grãos de areia individuais que são cercados pelo ar. No entanto, como a fração volúmica da areia é sempre superior a 50% neste modelo, é melhor pensar no ar como o material disperso. Com essa convenção, a viscosidade, que afeta a velocidade relativa do material disperso, deve ser a do ar, e é por este motivo que a viscosidade utilizada para caracterizar o fluxo de ar e areia é a viscosidade do ar [39, 40].

Para simular o escoamento do ar no interior da caixa de macho pelos respiros, o *software* considera todas as regiões de ar (por vezes referidas como regiões vazias) como bolhas adiabáticas. Uma bolha adiabática corresponde a um volume de ar cercado por paredes fluidas ou sólidas. A pressão numa bolha é uma função do volume da bolha e tem um valor uniforme sobre a região ocupada pela bolha. Os respiros, inseridos numa caixa de macho, permitem que o ar dentro destas bolhas seja expelido para o exterior da caixa. Para a utilização dos respiros é necessário especificar a sua localização, uma pressão de referência externa (isto é, a pressão fora da caixa de macho), e um coeficiente de fluxo. O coeficiente de fluxo é o produto da área dos respiros por um coeficiente de perda de fluxo associado ao tipo e ao *design* do respiro [39, 40].

Quando os respiros são cobertos por areia e, por isso, deixam de estar abertos, ainda é permitido que o ar escape através destes pela passagem do ar através da areia. Esta diminuição de pressão do ar é contabilizada no modelo, definindo uma ventilação global que age em todas as regiões de ar dentro da caixa, incluindo ou não um respiro real. A ventilação global consiste na soma acumulada de todos os respiros existentes, sendo depois esta soma modificada por um coeficiente adicional de perda de fluxo, que tem em conta as perdas existentes pelo facto de o ar ter de atravessar a areia compactada para conseguir chegar aos respiros. Sem esta ventilação global, o modelo não seria capaz de encher um macho completo, pois haveria regiões de alta pressão onde o ar ficaria preso, parando assim a simulação do processo de enchimento [39, 40].

O modelo de fluxo de deriva permite que o gás escape da superfície de uma mistura de areia/gás. Essa fuga pode ser simulada de duas maneiras: uma delas é através do cálculo do fluxo de deriva entre o gás e o sólido, que indica quanto gás se separa do material sólido à superfície [39-41]; a outra, é a suposição de que a fração volúmica do material sólido é sempre maior ou igual a 50%. Com efeito, esta é uma definição da superfície livre. Se a fração volúmica de sólido for inferior a 50%, então será removido gás suficiente da mistura sólido/gás de modo a restaurar a fração de volume de sólido, na superfície, para pelo menos 50% [39].

Em limites sólidos, onde o material granular pode estar a deslizar para longe do limite, resultando numa fração volúmica de sólido inferior a 50%, é feito um tratamento especial nessa zona. Neste caso, inicialmente não existe superfície livre e, por isso, é necessário criar um processo diferente de extração do ar. Assim, quando existe uma fração volúmica de sólido inferior a 50%, numa zona que não está identificada como superfície livre, a pressão nesse local relaxa em direção à pressão da ventilação global, abrindo-se essa zona, criando uma nova bolha de gás [39].

Outro elemento importante na modelação do fluxo bifásico de areia/ar é ter um mecanismo para a areia resistir ao movimento sob pressões aplicadas. No modelo contínuo, é usado um modelo de resistência do fluxo baseado em observações de injeção de areia e de dunas de areia. À medida que os grãos de areia atingem uma determinada densidade em que se começam a tocar, fica mais difícil para a mistura areia/ar conseguir fluir. Este estado é por vezes referido como um estado de encravamento mecânico. Para densidades de areia mais elevadas, correspondendo ao empacotamento da areia onde os grãos de areia permanecem em contacto com os grãos vizinhos, a areia não é capaz de fluir e torna-se difícil que os grãos e as partículas de ar troquem de lugar entre si. Este tipo de contacto é uma característica importante dos materiais granulares [39, 40].

Sólidos, como a areia, apenas podem ser compactados até um limite chamado de empacotamento compacto («*close-packing limit*») - valor limite para a fração volúmica da areia na mistura areia/ar. Um valor típico para um volume sólido de partículas esféricas de areia compactada e aconselhado usar no FLOW-3D é de 0,63 [39].

Em resumo, a modelação do enchimento de uma caixa de macho pela areia, num modelo contínuo, consiste numa única representação do fluido da mistura areia/ar. Esta mistura assume ter uma interface nítida entre a mesma e o ar circundante, e pode ter uma densidade variável ao longo do seu volume. Estas variações de densidade são calculadas em termos de um fluxo bifásico que permite o acondicionamento da areia, dependendo dos gradientes de pressão aplicadas no fluxo. Por fim, as regiões de ar no interior da caixa de macho são consideradas como compressíveis, só podendo diminuir de volume devido ao escape de ar através dos respiros [39-41].

3.3.1.2. Os Respiros em termos do *Software*

No FLOW-3D, os respiros funcionam como mecanismos para troca de gás de regiões dentro da malha do macho para regiões externas à mesma, a uma pressão inferior. Para o *software*, os respiros são chamados de «*vents*» e são caracterizados pela sua localização (*valx*; *valy*; *valz*), uma pressão externa (*valp*), um coeficiente (*valc*) que inclui a área do respiro (*Area*), e um fator de perda de fluxo. Se uma região de gás engloba um respiro, então irá ganhar ou perder gás dependendo da diferença entre a pressão do interior e do exterior do respiro [41]. O caudal volumétrico (*FlowRate*), através de um determinado respiro, é determinado a partir da expressão:

.....

$$FlowRate = Vc \times Area \times \sqrt{\frac{2|p - valp|}{\rho}} \quad (2)$$

O fator que se encontra dentro da raiz quadrada é uma aproximação de Bernoulli para a velocidade do fluxo que passa através da abertura devido à queda de pressão. Vc é um fator que ajusta essa velocidade com as perdas de fluxo [39]. A fórmula pode então ser reescrita como:

$$FlowRate = valc \times \sqrt{p - valp} \quad (3)$$

onde o fator Vc , a área útil do respiro, o fator 2 e a densidade do gás (ρ) foram todos integrados no coeficiente do respiro ($valc$) [39].

A maioria dos respiros são constituídos por orifícios ou ranhuras num determinado plano; assim, o *software* assume uma perda de fluxo, quando este passa através do respiro, de $\frac{1}{2}$ [39]. Sendo assim, o coeficiente do respiro passa a ser dado por:

$$valc = Area \sqrt{\frac{1}{2\rho}} \quad (4)$$

em que $Area$ corresponde à área real do respiro, compreendendo as ranhuras nele existentes e por onde o ar consegue escapar (Figura 6) [39].



Figura 6 – Exemplo de um respiro usado na SAKTHI Portugal.

O FLOW-3D permite que sejam definidos inúmeros respiros na mesma caixa. Se a fração volúmica do fluido bifásico, numa determinada zona da malha contendo um respiro, for superior a 0,5, então o *software* assume que a ventilação está bloqueada pelo fluido e, por isso, deixa de permitir que o ar escape por aquele respiro [39].

.....

3.3.1.3. Respiro Global (*Global Vent*)

Um macho de areia, mesmo para uma zona de areia compactada, é suficientemente poroso para permitir o fluxo de gás. Devido a esse facto, o FLOW-3D possui um modelo que permite que todas as bolhas de ar presentes numa caixa de macho sejam ventiladas, independentemente de apresentarem um respiro próximo ou não. Este modelo é chamado de «respiro global» (*global vent*), e tem a mesma formulação que um respiro individual. No entanto, neste caso, a pressão externa (*valpg*) é substituída pela soma de todos os valores *valc* dos respiros regulares. Além disso, o coeficiente de fluxo do respiro global (*flow coefficient of the global vent*) é multiplicado por um fator (*valgx*) que representa a perda média de fluxo quando este atravessa a areia, e a perda de fluxo devido à redução da área dos respiros provocada pela obstrução causada pela areia [39].

Num respiro único, a velocidade do fluxo que o atravessa é estimada usando uma aproximação de Bernoulli, juntamente com um fator de perda de fluxo. Para o respiro global, o ar deve fluir através da areia porosa. Assim, o *software* assume que a permeabilidade da areia é dominada por perdas de forma (*form losses*). Apesar deste afirmar que esta suposição pode não ser a mais correta, permite uma comparação mais direta com a expressão de Bernoulli para um respiro isolado [39]. Usando esta suposição, a velocidade do ar (μ), que atravessa a areia até chegar aos respiros, é estimada a partir da expressão:

$$|\mu| = \left(\frac{d(1 - f_s^{mx})^2}{6f_s^{mx}L} \right)^{1/2} \sqrt{\frac{2|p - p_0|}{\rho_a}} \quad (5)$$

Nesta expressão, p representa a pressão de ar interna, p_0 a pressão externa, ρ_a a densidade do ar, d o diâmetro dos grãos de areia, f_s^{mx} compactação máxima da areia (*maximum sand packing fraction*) e L a distância média entre a bolsa de ar e os respiros.

O volume de ar que atravessa, por unidade de tempo, este respiro global (*VolumeFlowRate*) é calculado pelo produto do número de respiros normais pela área de ventilação (A_{open}), reduzida pelo bloqueio da areia e multiplicada pela velocidade anteriormente calculada [39]:

$$VolumeFlowRate = (\text{número de respiros})A_{open}(1 - f_s^{mx})|\mu| \quad (6)$$

O quociente entre essa taxa e uma taxa de ventilação normal (eq. 4/3), estabelece o coeficiente de perda de fluxo adicional (*valcgx*), através da areia, que deve multiplicar a soma dos coeficientes normais de perda de fluxo do respiro [39]:

$$valcgx = \left(\frac{2(1 - f_s^{mx})^4}{3f_s^{mx}} \right)^{1/2} \left(\frac{d}{L} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Para uma compactação máxima da areia de 0,63 (f_s^{mx} – 63% de areia e 37% de ar), um diâmetro de grão médio de 0,02 cm e uma estimativa de $L = 1,0$ cm, essa expressão dá um $valcgx = 0,02$ [39].

Esta aproximação efetuada pelo *software* pode não ser a mais correta uma vez que selecionar um valor para L não é óbvio. Por exemplo, é mais provável que uma bolha de ar seja expelida pelo respiro mais próximo do que, como o *software* assume, esta seja expelida através de todos os respiros, independentemente da sua localização. Em todo o caso, o *software* estabelece que esta estimativa fornece uma aproximação clara à realidade, uma vez que esta forma de cálculo permite estabelecer um paralelismo entre o tamanho dos grãos de areia e o respiro global. Assim, o ar pode fluir mais facilmente para os respiros através de areia com granulometrias maiores, como seria de esperar [39-41].

3.4. QuikCAST

O QuikCAST é um *software* que se baseia em diferenças finitas. Tal como o FLOW-3D, este programa assume a injeção da areia no interior da caixa de macho como a de um fluido bifásico. Assim, uma vez mais, é utilizado um método contínuo de aproximação de dois fluidos. As equações de Navier-Stokes são, mais uma vez, utilizadas para prever velocidades e pressões na mistura areia/gás e fases gasosas, através de uma abordagem por diferenças finitas. A mistura é modelada como um fluido newtoniano monofásico cuja densidade é assumida como sendo constante e correspondente à densidade a granel da areia [33].

A mistura areia/ar é modelada como uma única fase não newtoniana em que a densidade é assumida como sendo constante e correspondente à densidade da areia a granel na fluidização nominal, e a viscosidade dinâmica é representada por:

$$\mu = \mu_{\infty} + \frac{(\mu_0 + \mu_{\infty})}{k_1} + k_2 \left(\gamma \frac{\vec{v}}{|\vec{v}|} \right) \quad (8)$$

onde μ_0 representa a viscosidade mínima que se regista a alta taxa de cisalhamento e μ_{∞} a viscosidade máxima para a taxa de cisalhamento zero. k_1 e k_2 são parâmetros do modelo, \vec{v} o vetor velocidade, e γ a taxa de cisalhamento, definida como:

$$\gamma = \sqrt{\text{trace}(\dot{\gamma}:\dot{\gamma})} \quad (9)$$

Para realizar a simulação da injeção da areia na caixa de macho é necessário que seja definida a pressão aplicada. Para permitir que a pressão varie ao longo da cavidade da caixa de macho, esta condição de pressão é apenas aplicada no topo do injetor utilizado. Como, no processo que está a ser simulado, o fator determinante é a localização dos diferentes respiros, estes possuem uma condição limite de perda de pressão da forma:

$$\Delta P = \rho k \frac{v^2}{2} \quad (10)$$

em que ρ é a densidade, v a velocidade e k um coeficiente que depende da geometria do respiro. Este coeficiente é também ponderado pela quantidade de areia presente em torno de cada respiro, com o objetivo de reduzir o efeito de ventilação quando fica cheio.

3.5. Arena-flow

Sediada no Novo México, EUA, a Arena-flow LLC é reconhecida como pioneira, a nível mundial, na simulação de fluxos de areia, depois de comercializar com sucesso o seu *software* de simulação de fluxo de areia de macho (Arena-flow) baseado no método CPFDF (*Computational Particle Fluid Dynamics*). Hoje, a simulação de fluxo de areia é utilizado em diferentes OEMs (*Original Equipment Manufacturer*) e fundições em todo o mundo [32, 43].

Desenvolvida no Laboratório Nacional de Los Alamos (anteriormente conhecido por Laboratório Científico de Los Alamos), nos anos 50 e 60 do séc. XX, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, o acrónimo da sua designação em Inglês), é uma expressão matemática e física dos movimentos de fluidos, isto é, líquidos e gases. O *software* de computação CFD permite simular fluxos de fluidos do mundo real, como por exemplo o fluxo de ar sobre uma asa de uma aeronave, ou o fluxo resultante do derramamento de óleo num canal de um rio. Durante muito anos, acreditou-se que a areia numa ampulheta «fluía» e, por isso, durante muito tempo, foram utilizados códigos de computador CFD para modelar e prever o movimento de partículas, bem como de fluidos [25, 43].

No entanto, no caso da areia, as partículas são sólidas, não fluidas. A Arena-flow resolveu o problema de longa data de como incorporar a física correta do movimento de partículas sólidas junto com fluidos (transportadores), resultando no seu método de simulação numérica CPFDF [25, 43].

A ideia para o método numérico CPFDF original foi incubada com a assistência da General Motors, NASA, e a Universidade de Auburn (Alabama). O *software* foi desenvolvido para modelar o fluxo de areia nas caixas de macho, de modo a auxiliar os projetistas a determinar a razão pela qual os machos de areia não eram consistentemente de elevada qualidade. Este foi o primeiro produto comercial disponível usando o inovador método CPFDF [25, 43].

Relativamente às potencialidades do *software*, no caso do processo de presa com gás, permite simular diferentes variáveis, tais como: a modelação do fluxo de ar, a cura através da amina ou do SO₂, enchimento da caixa de macho, variações de densidade no macho, desgaste da ferramenta, necessidade de resina, e distribuição do tamanho das partículas de areia. O *software* permite utilizar diferentes tipos e misturas de areias, e avalia a fluidez da areia, bem como a ventilação da caixa de macho e o seu desempenho [25, 43].

3.5.1. Dinâmica de Fluidos de Partículas Computorizada (*Computational Particle Fluid Dynamics – CPF*)

Existem várias abordagens para modelar o enchimento de caixas de macho. Todas elas começam com as leis básicas da conservação de massa e momento. A formulação dessas equações pode ser classificada como contínua ou discreta. O desafio de modelar com precisão o enchimento de caixas de macho por areia centra-se no facto de tanto o ar como a areia terem um comportamento importante e distinto durante o enchimento da caixa. O processo inicia-se com um movimento conjunto da areia e do ar, mas, no entanto, quando a areia começa a compactar nas paredes da caixa de macho, o ar deve ser deslocado e fluir na direção dos respiros, bem como do(s) pino(s) ejetor(es) ou das folgas na linha de apartação da caixa de macho. Segundo os responsáveis pelo desenvolvimento do *Arena-flow*, como, neste processo, nem o ar nem a areia podem ser negligenciados, uma abordagem de modelação contínua, ou puramente discreta, não é capaz de capturar com precisão a multifase física presente. Uma abordagem monofásica e contínua negligencia inteiramente a areia, ou modela a mistura areia/ar como um fluido pesado [32].

Para o *Arena-flow*, é evidente que é necessária uma abordagem multifásica, tendo sido tentadas várias alternativas ao longo do tempo, embora sem grande sucesso. A maioria dos métodos multifase comumente tentados para a modelação do enchimento de uma caixa de macho é referida como «Eulerian-Eulerian» ou «contínuo-contínuo», através da abordagem pela dinâmica de fluidos (CFD). Isso significa que existem duas fases distintas no modelo, onde ambas utilizam uma formulação Euleriana contínua dos conjuntos de equações, resultando em campos separados para o ar e areia. Como resultado, o conjunto bifásico areia/ar é tratado pela maioria dos *softwares* como um líquido com diferentes densidades e viscosidades [32].

O maior problema com este tipo de modelos é que a suposição adjacente de que a areia é um fluido não é correta. Um material granular, como a areia, não vai deformar-se sob o efeito da pressão aplicada, como um fluido. Os materiais granulares suportam o seu peso através de forças de contacto entre as partículas, e não através de um gradiente de pressão hidrostática, como acontece com um líquido. Um material granular não pode ser infinitamente dividido, como acontece com um fluido. Além disso, a areia tem uma distribuição de tamanho associada que deve ser tida em conta. Como já foi referido anteriormente, apesar destas deficiências, este tipo de métodos ainda está a ser testado e aplicado como extensões de *softwares* já existentes de simulação de fluxos de solidificação de metal [32].

Como o *Arena-flow* não considera a solução por CFD um método que permita simular, com precisão, o enchimento de caixas de macho por areia, desenvolveu então uma nova abordagem. A esta nova abordagem chamou de Dinâmica de Fluidos de Partículas Computorizada (CPF). Esta nova técnica usa um método de cálculo «Euleriano-Lagrangiano» ou «contínuo-discreto» para modelar a areia multifásica injetada no enchimento da caixa de macho. O ar é caracterizado como contínuo num quadro de referência euleri-

.....

ano, enquanto a areia é considerada como discreta num quadro de referência langrageano. Assim, o CPF D pode ser pensado como dois solucionadores (*solvers*) num só. Um *solver* CFD para o ar e um *solver* de partículas para a areia [32]. Mais informações sobre o funcionamento dos métodos por CPF D podem ser encontradas na literatura [44-46].

.....

CAPÍTULO 4

CASO DE ESTUDO

4.1. Macho Utilizado como Caso de Estudo

Para a realização da parte prática desta dissertação, utilizou-se como exemplo um macho utilizado na produção de uma caixa diferencial, pela empresa SAKTHI Portugal, na Maia (Figura 7). Como é possível observar na imagem, a este macho é aplicado revestimento de proteção e de aprimoramento da rugosidade da superfície nas zonas mais sensíveis. A caixa de macho utilizada na produção desta referência é uma caixa de aço, vertical dupla, que é capaz de produzir 10 machos por cada abertura (5 de cada lado), sendo utilizada numa máquina Loramendi SE-25CF. O macho apresenta um peso de 1,2 kg. Os parâmetros utilizados no processo de produção deste macho são apresentados na Tabela 1.



Figura 7 – Caixa de macho utilizada na produção desta referência e respetivo macho.

Tabela 1 – Parâmetros de operação para a produção do macho

| Descrição | Mínimo | Máximo |
|-------------------------------------|------------------|------------------|
| Pressão de injeção (kg/cm^2) | 2 (196133 Pa) | 6 (588399 Pa) |
| Tempo de injeção (s) | 2,5 | 4 |
| Pressão de gaseamento (kg/cm^2) | 2 (196133 Pa) | 6 (588399 Pa) |
| Tempo de gaseamento (s) | 2,5 | 5 |
| Tempo de cura (s) | 15 | 30 |

4.2. Metodologia Aplicada no FLOW-3D

Para iniciar a utilização deste *software*, foi necessário importar a geometria a partir de um ficheiro estereolitográfico (STL) na configuração *Model Setup* ▶ *Meshing & Geometry*.

Para realizar uma simulação de enchimento de caixa de macho no FLOW-3D é necessário ativar o modo *granular flow* do programa, e indicar que o fluido utilizado é um gás. Para ativar este modo, foi necessário selecionar a opção «*granular flow in gas*» em *Physics* ▶ *Granular Flow*. Ao ativar este modo, o programa automaticamente abre uma janela onde é necessário definir o diâmetro médio dos grãos de areia, e o peso específico e viscosidade do fluido (neste caso, do ar) - Figura 8. Foram utilizados os seguintes valores para os diferentes parâmetros: peso específico da areia - 2650 kg/m^3 ; diâmetro médio dos grãos de areia - $0,556 \text{ mm}$; peso específico do ar - 1204 kg/m^3 (peso específico à temperatura de 20°C); e viscosidade do ar - $1,81 \times 10^{-5}$ [47].

Como já foi dito anteriormente, os valores a utilizar para «*maximum close-packing volume fraction*» e «*volume fraction of mechanical jamming*» devem ser 0,63 e 0,61, respetivamente. A fração volúmica de interferência mecânica «*volume fraction of mechanical jamming*» representa a fração de volume de areia acima do qual o fluxo sofre resistência devido à interação grão-grão, sendo o valor aconselhado usar pelo *software* de 0,61. O valor de «*loose packing volume fraction*» corresponde ao valor da fração volúmica de grãos de areia quando estes se encontram apenas suficientemente encostados para suportar o seu peso sob a ação da gravidade. O valor aconselhado a usar para este parâmetro é de 0,55 [39].

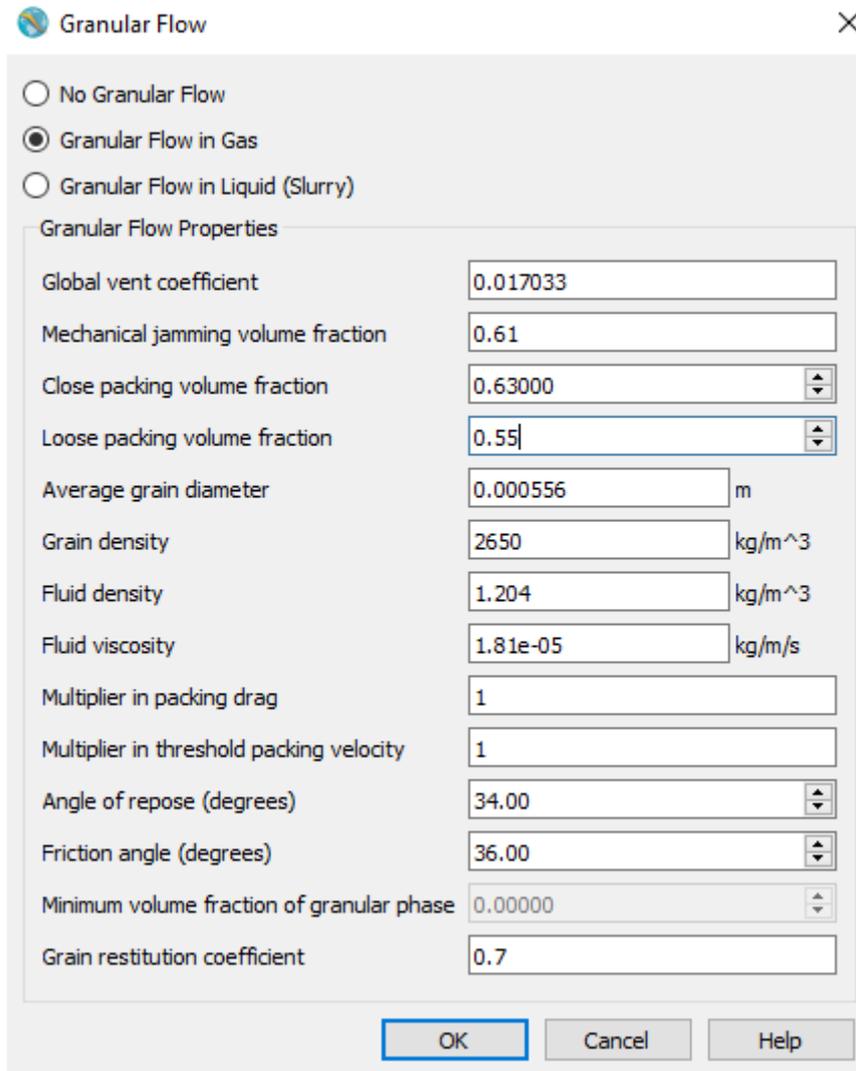


Figura 8 – Parâmetros utilizados no modo «Granular Flow in Gas».

4.2.1. Cálculo do *Global Vent Coefficient*

Como foi explicado anteriormente, o respiro global (*global vent*) controla a ventilação total do ar através da areia quando os respiros já estão tapados. O coeficiente de ventilação global (*global vent coefficient*) é um multiplicador que determina a perda média de velocidade do fluido através da areia e a redução da área útil dos respiros devido ao entupimento provocado por esta [39]. Assim, para calcular este coeficiente, o *software* aconselha a utilização da seguinte fórmula:

$$valc_{gx} = \left(\frac{2(1 - f_s^{mx})^4}{3f_s^{mx}} \right)^{1/2} \left(\frac{d}{L} \right)^{1/2} \quad (11)$$

Para a realização deste cálculo, foi utilizado para d o valor de 0,556 mm, que corresponde ao valor do tamanho médio de grão da areia utilizada pela SAKTHI Portugal. Para f_s^{mx} , correspondente ao *maximum close-packing*, utilizou-se o valor de 0,63. O valor de L foi estimado, calculando, através do *software SolidWorks*, o valor da espessura média da peça, tendo-se chegado ao valor 76,01 mm. Este valor deve depois ser dividido por 2 para representar uma aproximação à distância média que o ar pode percorrer até chegar a um respiro que se encontra na superfície da peça. Assim, obtém-se:

$$valc_{gx} = \left(\frac{2(1 - 0,63)^4}{3 \times 0,63} \right)^{1/2} \left(\frac{0,556}{\frac{76,01}{2}} \right)^{1/2} = 0,017033 \quad (12)$$

Quando se seleciona a opção de fluxo granular, são ativados automaticamente vários outros modelos no programa. A viscosidade da mistura não precisa de ser definida, pois é calculada automaticamente no modelo.

Duas variáveis auxiliares estão disponíveis: uma é o multiplicador da velocidade limite (*multiplier in threshold packing velocity*), e o outro é o multiplicador do empilhamento de arrasto (*multiplier in packing drag*). O primeiro indica a velocidade acima da qual o fluido colocará em movimento o material sólido e denso. O segundo é utilizado para indicar ao *software* que não é necessário injetar mais mistura quando a mistura dos grãos de areia já apresentam uma densidade suficientemente alta. Ambas as variáveis devem permanecer nos valores padrão indicadas pelo *software*, a menos que o utilizador saiba que o material granular apresenta forças coesivas ou outras que possam alterar esses valores. No entanto, segundo as instruções para utilizar o *software* da simulação de enchimento de caixas de macho, estas variáveis não devem ser definidas, assim como o campo referente ao ângulo de repouso (*angle of repose*), cujo valor, por omissão, é de 34° [48].

Outra grandeza de entrada auxiliar é o ângulo de atrito, que é tipicamente 2 a 8° superior ao ângulo de retenção. O ângulo de atrito é importante no caso de um fluido ser líquido, onde ele influencia a pressão dispersiva que surge no fluxo de cisalhamento da colisão entre partículas sólidas; neste caso, também não foi necessário preencher este parâmetro, mantendo-se, por omissão, o valor de 36° [48].

O coeficiente de restituição do grão (*grain restitution coefficient*) é usado para estimar a quantidade de energia que é retida por um grão de areia quando este colide contra uma superfície sólida. O valor sugerido utilizar pelo manual do *software* é de 0,7 [48].

Além disso, foi necessário ativar o modo *Gravity and non-inertial*, para definir a direção correta da gravidade, e foi ativado o modo *Viscosity and Laminar Flow* na configuração *Viscosity and Turbulence* [48].

O módulo de avaliação da densidade (*Density Evaluation*) é ativado automática e simultaneamente com o módulo *Granular Flow*. Este módulo é necessário para calcular a

evolução da densidade da areia. Foi ainda necessário ativar a configuração *Bubble and Phase Change* para permitir que o gás escape pelos respiros existentes [48].

4.2.2. Seleção das Condições Iniciais e de Fronteira

As condições iniciais podem ser adicionadas no separador *Meshing and Geometry*. As condições iniciais da região do vazio ou da região da bolha já foram definidas quando o modelo da bolha adiabática foi ativado a partir do modelo *Bubble and Phase Change*.

As condições da fronteira são definidas em *Boundary conditions* ▶ *Mesh Block 1*. Sendo a areia injetada na caixa de macho, recorrendo a ar sob pressão, é necessário definir um valor para a densidade da mistura ar/areia e para a pressão de injeção.

Como o material granular entra, através da fronteira da malha, na zona do injetor, é necessário definir a densidade inicial do fluido bifásico areia/ar na janela da *Boundary Condition* (Figura 9). Para evitar que ocorra um bloqueio do fluxo durante a sua entrada, o valor da densidade inserido deve representar uma fração volumétrica inferior à do *close-packing volume fraction* [48]. Por exemplo, se os valores utilizados para os pesos específicos do fluido e da areia forem, respetivamente, de 1000 kg/m^3 e de 1540 kg/m^3 , então os valores a inserir na janela *Boundary Conditions* do fluido de entrada devem situar-se entre 1000 e 1340 kg/m^3 ($1540 \times 0,63 + 1000 \times 0,37$).

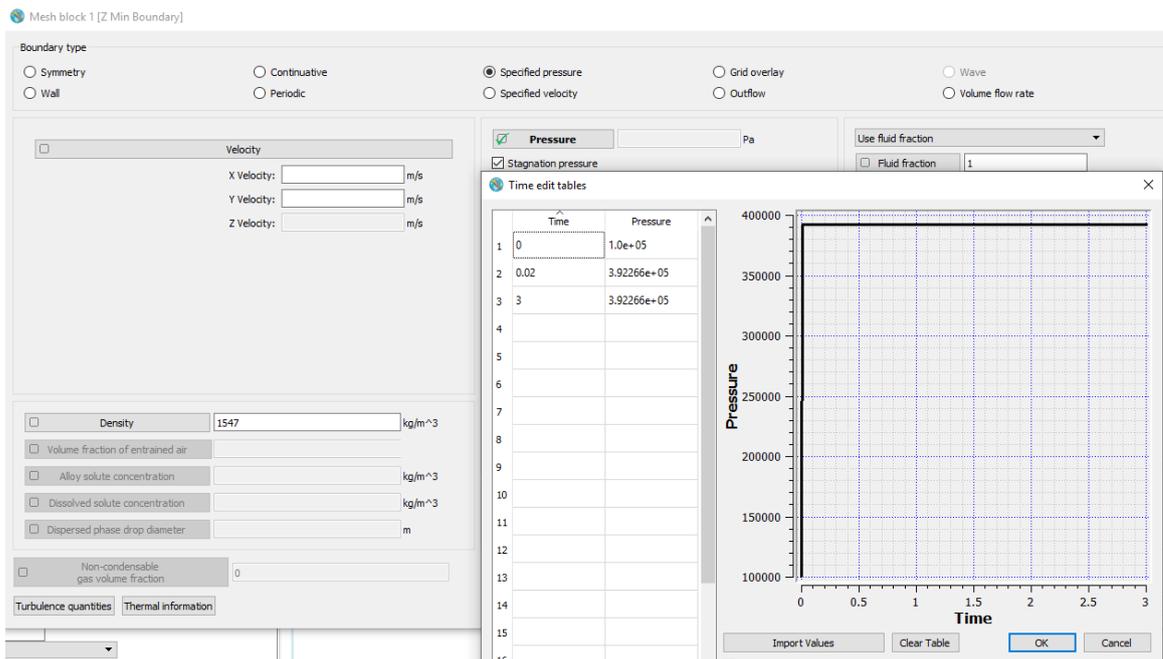


Figura 9 – Parâmetros utilizados na *Bondary Condition* para a entrada do fluido.

4.2.3. Respiros

A melhor forma de adicionar os respiros no *software* é utilizar componentes geométricos, criando um componente separado na árvore no separador *Meshing and Geometry*. É necessário criar como um componente separado pois os respiros possuem as suas

próprias propriedades, e os componentes são agrupados na árvore segundo as suas propriedades. Assim, quando programado desta forma, os respiros não ocupam volume. No caso de os respiros possuírem todos o mesmo diâmetro, então podem ser todos modelados com um só STL, ou modelados usando primitivas no mesmo componente; caso possuam diâmetros diferentes, os respiros devem ser introduzidos na árvore como componentes individuais. Para definir estes componentes como respiros, foi selecionado o tipo de componente *Component Type* ▶ *Granular Flow Vent*. De seguida, devem ser definidas as propriedades do componente, tais como: diâmetro do canal do respiro, pressão externa, e a área útil do respiro, na configuração *Meshing & Geometry* ▶ *Component* ▶ *Component Properties* ▶ *Granular Flow Vent Properties* (Figura 10) [48]. A área útil do respiro foi obtida de uma tabela fornecida pelo respetivo fornecedor (Anexo A).

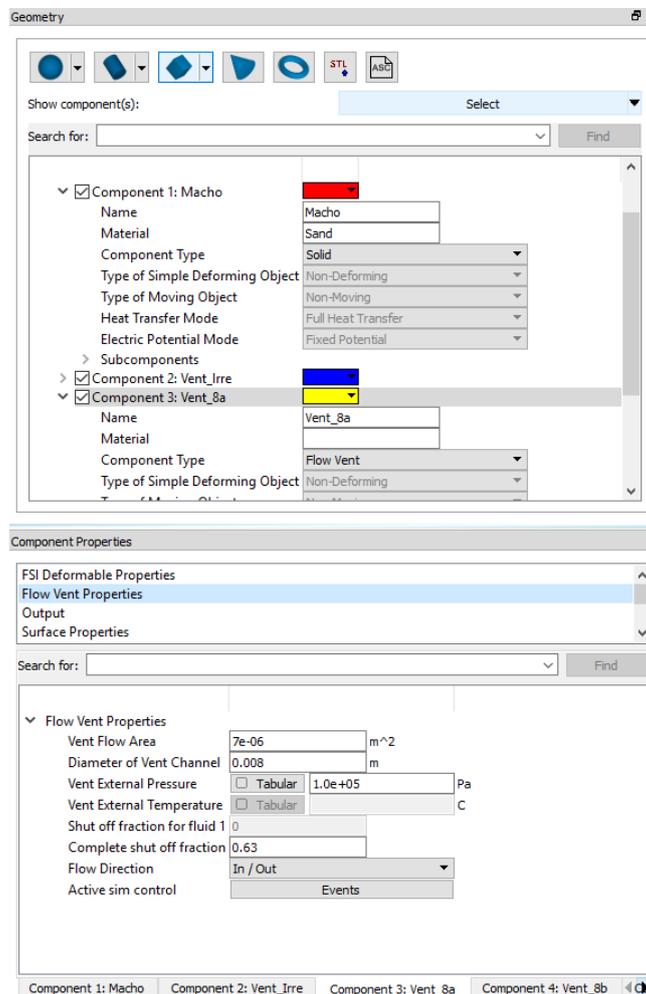


Figura 10 – Propriedades dos respiros no FLOW-3D.

4.2.4. Output

Para correr a simulação, foi ainda necessário selecionar os *outputs* desejados. Neste caso, foi selecionado como objetivo a densidade final do macho. A densidade fornece informação sobre zonas que possam estar a ser mal preenchidas e compactadas, e, por

isso, serão zonas com uma densidade inferior à esperada. Foi ainda selecionado o tempo de enchimento pretendido (3 segundos), que corresponde ao tempo de enchimento utilizado na produção deste macho na SAKTHI Portugal.

4.2.5. Visualização dos Resultados

Para visualizar os resultados foi utilizado o *software* FlowSight do FLOW-3D. Este *software* permite avaliar os resultados obtidos nas simulações do FLOW-3D através de uma interface melhorada e mais interativa.

Relativamente aos parâmetros utilizados para analisar os resultados foi utilizado o parâmetro que caracteriza a distribuição de densidade no macho. Assim é possível observar as zonas que podem possuir menor densidade e por isso uma concentração de grãos de areia menor. Serão então essas zonas que terão maior probabilidade de ocorrência de defeitos.

4.3. Metodologia aplicada no QuikCAST

As simulações no QuikCAST foram feitas utilizando os seguintes parâmetros:

1 Atribuir condições dos volumes (Figura 11):

- os volumes foram renomeados como *Core* e *Inlet*;
- foi selecionado o tipo *Core Blowing* para ambos os volumes;
- foram selecionados o material indicado para a simulação e as respetivas frações de enchimento iniciais;
- selecionado, como temperatura inicial de ambos os volumes, o valor de 20°.

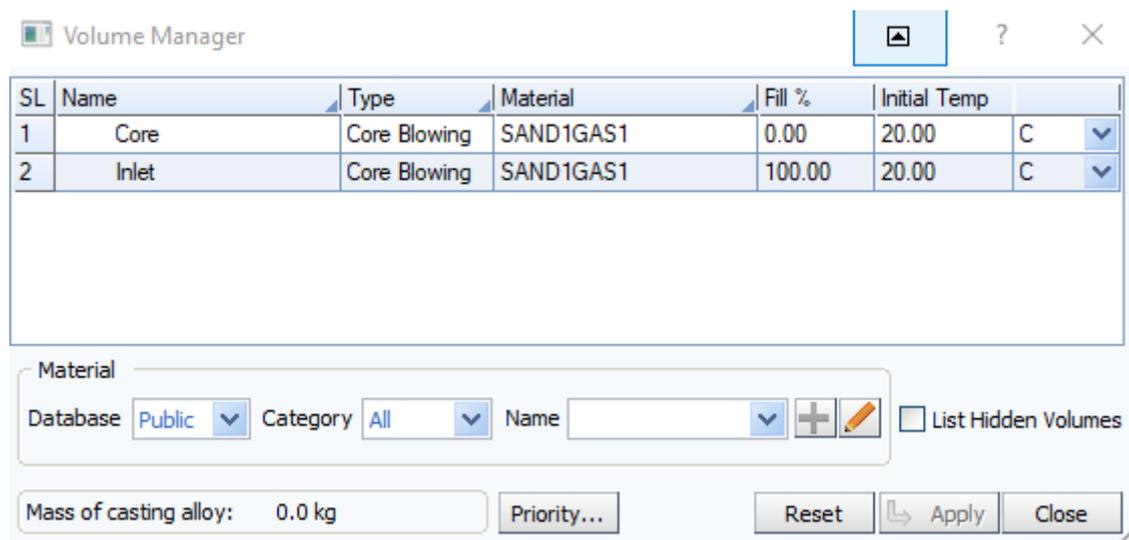


Figura 11 – Condições atribuídas aos volumes do macho e do injetor.

2 Seleção das condições de fronteira (*Boundary Conditions*) – Pressão (Figura 12):

- foi adicionada uma nova condição de pressão;
- foi selecionada a superfície superior do injetor desenhado;
- foram consideradas as pressões de injeção desejadas para a respectiva simulação (196133 Pa, 392266 Pa e 588399 Pa).

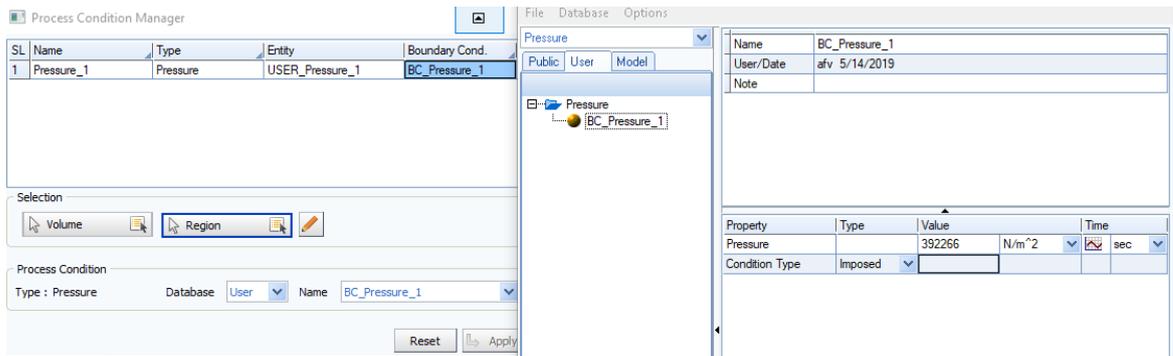


Figura 12 – Condições de pressão selecionadas.

3 Seleção das condições de fronteira (*Boundary Conditions*) – fluido inicial imposto (*Imposed Initial Fluid*) (Figura 13):

- foi criada uma nova condição de *Imposed Initial Fluid*;
- foi selecionado o volume do injetor e uma fração de enchimento de 100%.

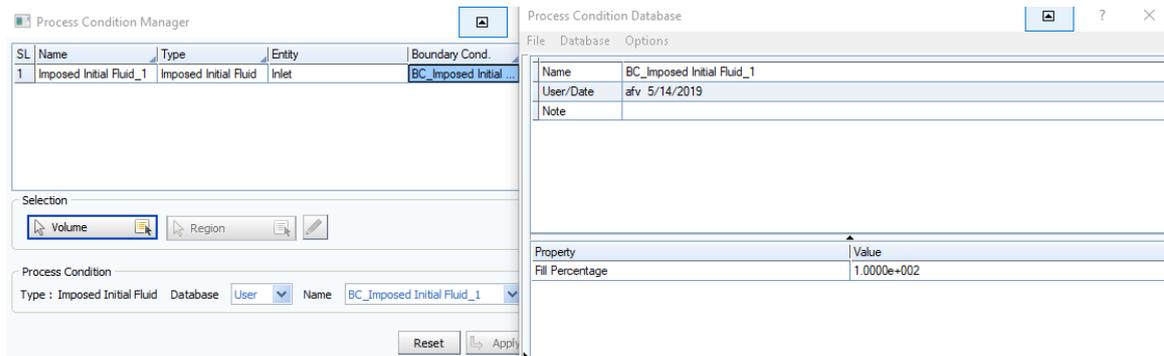


Figura 13 – Condições de *Imposed initial Fluid* utilizadas.

4 Seleção das condições de fronteira (*Boundary Conditions*) – Respiros (*Air Venting*) (Figura 14):

- foi criada uma nova condição para os respiros *Air Venting*;
- foram definidas as respectivas regiões de cada respiro, usando a seleção de faces;

- foi selecionado um *Region Weighting factor* nessas zonas de 20%.

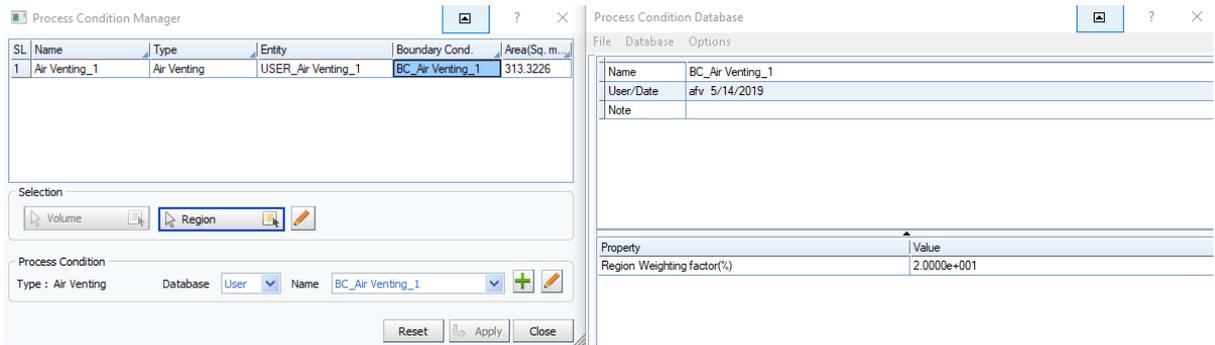


Figura 14 – Condições de fronteira imposta aos respiros.

5 Seleção das condições de fronteira (*Boundary Conditions*) – Rugosidade (*Region Roughness*) (Figura 15):

- foi criada uma nova condição para a rugosidade (*Region Roughness*);
- foi selecionada a região correspondente à superfície do macho;
- foi escolhido um índice de rugosidade de 0,05, aconselhado pelo guia do *software*.

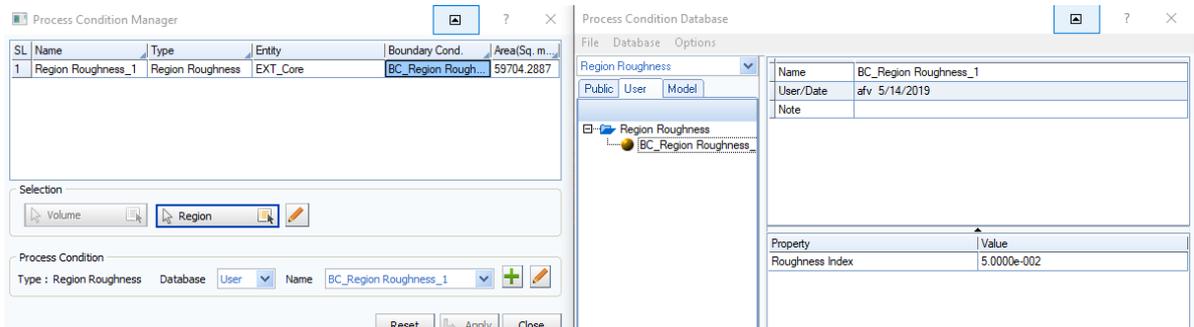


Figura 15 – Rugosidade selecionada para a superfície do macho.

- 6 Foram ainda selecionados os parâmetros para a simulação, nomeadamente: o tipo de simulação *Sand Core*, o tipo de cálculo *Standard Calculation*, e a opção de cálculo *Blowing*. Foi desativada a opção *Thermal Calculation During Filling*, e selecionado 1 para o critério de fim de enchimento (*End Filling Criteria*). Como critério para parar o enchimento, foi selecionada a opção tempo e fração de enchimento (*Time and % Fill*) (Figura 16).

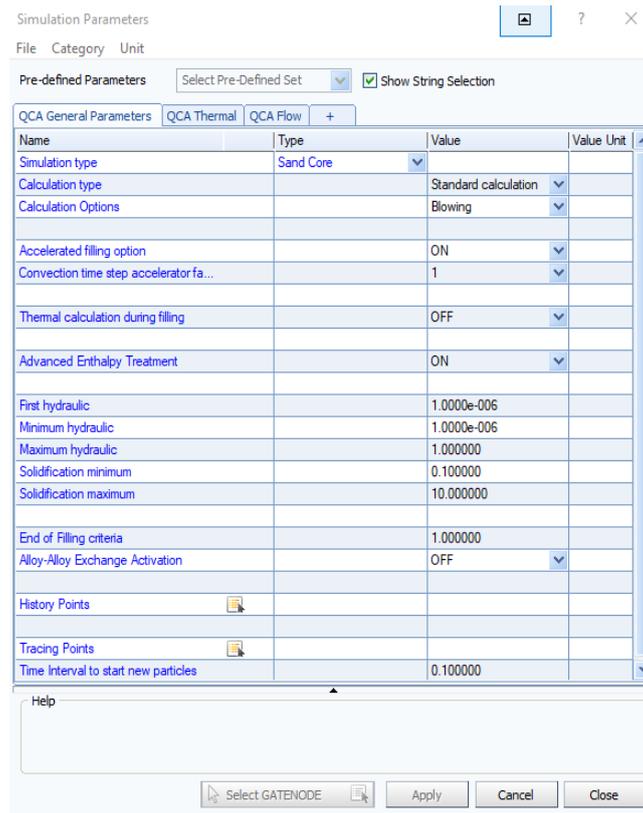


Figura 16 - Parâmetros utilizados para a simulação.

4.3.1. Visualização dos Resultados

O QuikCAST permite analisar os resultados na aplicação «*Visual-Viewer*». Relativamente ao fluido, é possível avaliar a pressão no interior do macho, a fração volúmica da areia nas diversas zonas, a localização de possíveis bolhas de ar, e o tempo de enchimento de cada zona do macho.

Para a avaliação das zonas que possuem maior predisposição à existência de defeito, foi utilizado o modo de visualização da fração volúmica da areia nas diferentes zonas do macho. Desta forma, é possível analisar em que zonas existe maior probabilidade de o macho apresentar falta de areia e, por isso, maior probabilidade de ocorrência de um defeito. Foi ainda analisada a localização prevista de possíveis bolhas de ar, sendo este um resultado mais direto, fornecendo a localização das zonas onde é mais provável o aparecimento de bolhas de ar e o não preenchimento pela areia, formando assim defeitos na superfície.

4.4. Comparação entre Injeções a Diferentes Pressões

Foi ainda realizado um teste na caixa de macho real, na máquina habitualmente utilizada. Neste teste, foi realizada uma abertura, da caixa de macho, para o fabrico de machos com a pressão de injeção de areia mais baixa programável de 2 Kg/cm²; com uma

.....

pressão intermédia de 4 Kg/cm^2 ; e com uma pressão máxima de 6 Kg/cm^2 , com o objetivo de comparar os machos produzidos com os resultados obtidos pelas simulações. As aberturas foram realizadas assim que a caixa de macho chegou da manutenção da serralharia da fábrica, de modo a garantir que a mesma se encontrava perfeitamente limpa. Desta forma, podemos excluir o aparecimento de defeitos devido a sujidade existente na caixa, e evitar que possam existir respiros entupidos que levem a uma extração insuficiente do ar do interior da caixa de macho durante o seu enchimento.

Como se pode observar na Figura 17, os machos produzidos utilizando a pressão de injeção de areia mais baixa foram os que apresentaram defeitos de maiores dimensões nas quatro paredes laterais do macho. Estes defeitos foram observados em todos os machos produzidos com essa abertura, tendo obrigado o operador a rejeitar todos os machos fabricados. Os machos produzidos a uma pressão intermédia de 4 Kg/cm^2 saíram, na sua maioria, perfeitos. No entanto, em alguns casos, foi observado um defeito idêntico aos obtidos com a pressão mais baixa, mas desta vez com uma dimensão inferior e apenas em um ou dois dos lados do macho. Quando este defeito surgiu em apenas um dos lados do macho e era de muito pequena dimensão, foi possível solucioná-lo através da pintura do macho. Os machos fabricados a uma pressão máxima de 6 Kg/cm^2 apresentavam todas as condições para serem utilizados, não evidenciando qualquer defeito na sua superfície.

Este ensaio teve como objetivo servir como termo de comparação para as simulações realizadas nos dois *softwares* utilizados nesta dissertação. Assim, pretende-se observar se os defeitos que ocorrem no fabrico deste macho conseguem ser previstos pelos *softwares* de simulação e se é possível otimizar o fabrico do macho com recurso a estes programas.

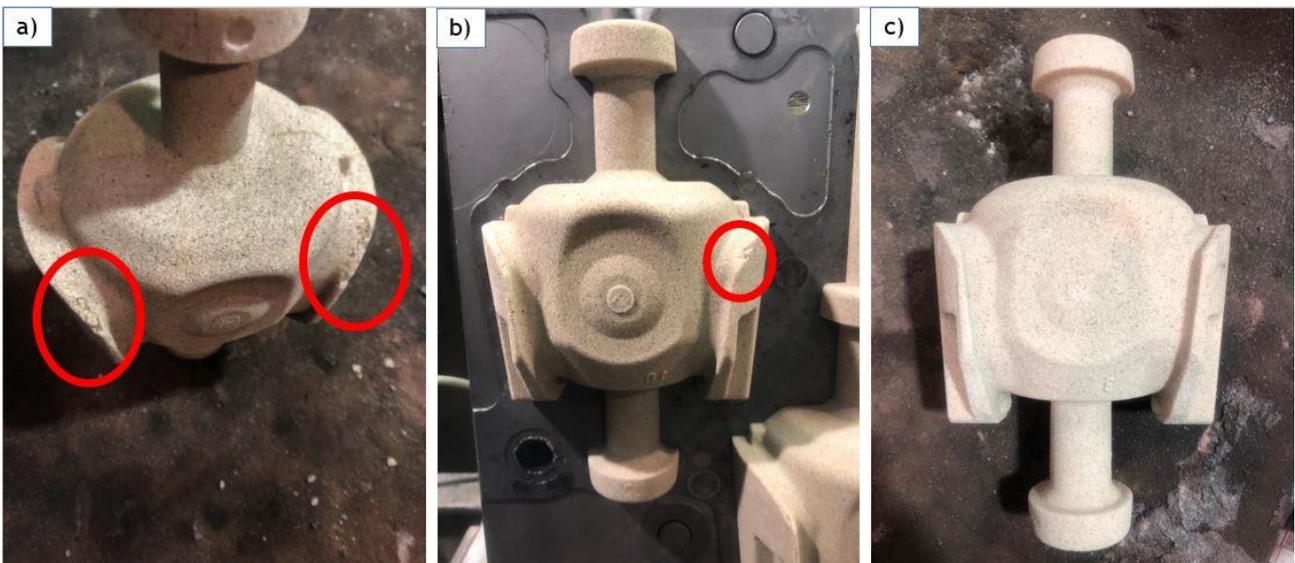


Figura 17 – Defeitos surgidos no fabrico dos machos para diferentes pressões de injeção: a) 2 Kg/cm^2 , b) 4 Kg/cm^2 , c) 6 Kg/cm^2 .

.....

4.5. Comparação entre Resultados de Simulações com Diferentes Pressões de Injeção

Como já foi referido anteriormente, foram realizadas diversas simulações para diferentes pressões de injeção de areia, utilizando os respiros nas mesmas posições das existentes na caixa de macho dos ensaios. Estas simulações foram realizadas com os dois *softwares* disponíveis: FLOW-3D e QuikCAST.

4.5.1. FLOW-3D

Para a visualização dos resultados no *software* FLOW-3D, foi utilizada a previsão de densidade em cada zona do macho. Neste modo é possível perceber-se que zonas do macho têm maior probabilidade de apresentarem uma densidade inferior e, por isso, uma maior probabilidade de aparecimento de um defeito. A nível de escala, um bom valor para o peso específico da areia seria de 1668 kg/m^3 o que corresponde ao valor máximo possível obter com areia compactada. Um valor entre 1400 kg/m^3 e 1500 kg/m^3 corresponde ao valor do peso específico da areia que é apenas introduzida num recipiente e levemente agitada para que os grãos de areia se ajustem melhor ao espaço existente. Assim, um valor nesse intervalo corresponde a uma zona onde a areia terá sido introduzida sem sofrer compactação, levando assim à possibilidade de existência de defeitos; um valor inferior representa uma zona mal preenchida pela areia e, por isso, com forte possibilidade de existência de defeito [49].

Na Figura 18 são apresentados os resultados obtidos, com a simulação no *software* FLOW-3D, para as diferentes pressões. Nestas simulações, foi utilizado uma dimensão de malha de 0,002 m. Na simulação, à pressão de injeção mais baixa, o *software* não consegue atingir os 3 segundos, e para ao segundo 1,509, dando um erro. Este erro foi reportado ao suporte do programa, que não conseguiu caracterizá-lo e avançar com uma solução. De forma a tentar contornar este problema, foram realizadas novas simulações, apresentadas mais à frente neste trabalho, com uma malha de dimensões superiores.

Relativamente às simulações realizadas com as pressões intermédias e máxima, o *software* conseguiu atingir os 3 segundos. No entanto, no resultado obtido, as zonas mais suscetíveis de aparecer defeito (a azul) não são observadas na prática como problemáticas, e as zonas a verde que indicam que também é uma zona com probabilidade de aparecimento de defeito encontram-se acima da zona onde os defeitos, na experiência realizada, efetivamente aparecem. As zonas observadas como problemáticas na prática aparecem com uma cor que representa um peso específico da areia compactada, de 1668 kg/m^3 .

Outro problema significativo detetado é o facto de, ao contrário do esperado, não ter sido observada grande diferença entre os resultados para diferentes pressões: apenas existe uma diferença significativa entre os referentes à pressão inferior e às outras duas ensaiadas. No entanto, o resultado obtido na simulação, para uma pressão de 2 kg/cm^2 ,

corresponde ao resultado ao fim de 1,509 segundos, não devendo por isso ser comparada de igual modo com as restantes.

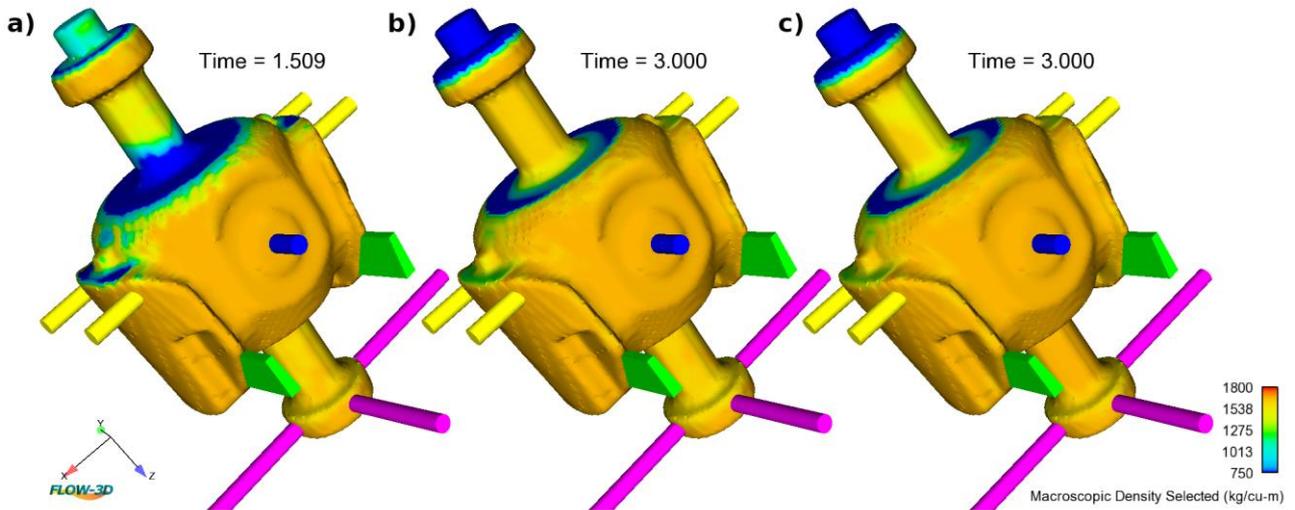


Figura 18 – Resultados obtidos, com o FLOW-3D, a diferentes pressões de injeção da areia, para uma dimensão de malha de 0,002 m: a) 2 kg/cm²; b) 4 kg/cm²; c) 2 kg/cm².

Com o objetivo de observar se ocorreria alguma diferença significativa no resultado da simulação realizada, foi experimentado aumentar o tempo de enchimento (na simulação) de 3 segundos para 6 segundos, para a pressão de injeção intermédia.

No entanto, como mostra a Figura 19, a zona superior do macho aparece novamente como mal preenchida, não havendo qualquer indicação de ocorrência de defeitos noutras zonas do macho; apenas ocorre uma mudança ligeira da tonalidade do azul e do verde nas respetivas zonas, o que indica que o aumento do tempo de enchimento teria promovido o seu melhor enchimento, mas não o suficiente para evitar o aparecimento de defeito.

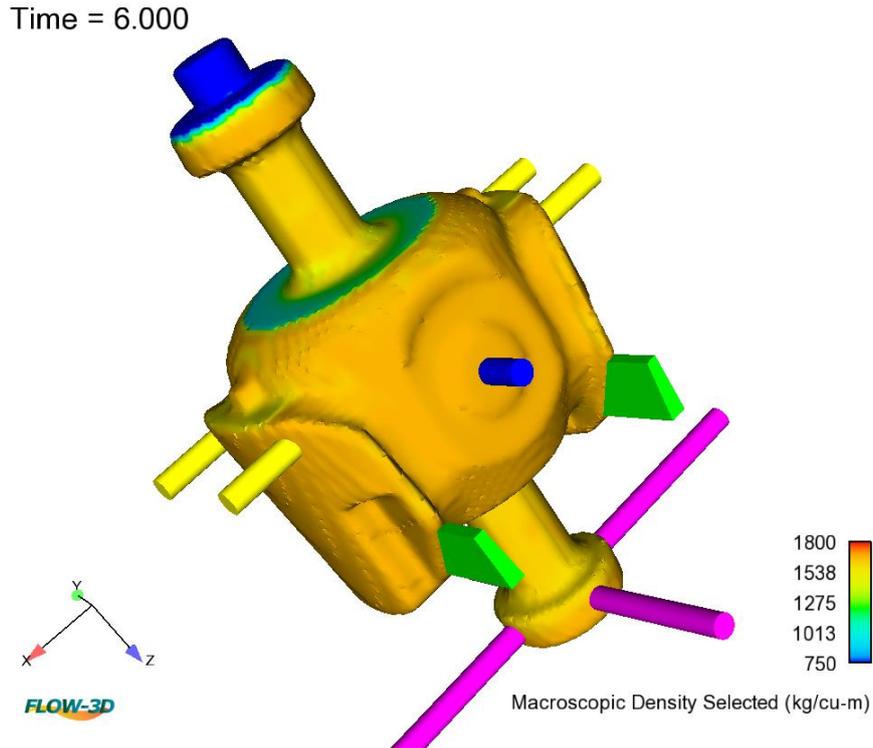


Figura 19 – Simulação, realizada no FLOW-3D, à pressão de 4 kg/cm², para uma dimensão de malha de 0,002 m e um tempo de enchimento de 6 s.

Com o objetivo de solucionar o problema observado na simulação com pressão de injeção inferior, foi ainda experimentado realizar as mesmas simulações com uma dimensão de malha de 0,003 m (Figura 20). Assim, foi conseguido obter um resultado para a simulação à pressão de injeção mais baixa sem que o programa desse erro antes de atingir os 3 segundos. Os resultados obtidos foram substancialmente diferentes dos obtidos com a malha de 0,002 m.

O azul que se observava nas zonas superiores desaparece, dando agora lugar a uma cor correspondente a um bom valor de compactação da areia. As zonas laterais permanecem com indicação de uma compactação insuficiente da areia, aparecendo a verde, assim como a zona de ligação entre o corpo do macho e a zona superior. Mais uma vez, estas zonas apontadas pela simulação não correspondem à zona problemática registada experimentalmente. Além disso, volta a não ser observada uma diferença significativa entre as simulações para diferentes pressões de injeção. Este facto não é compatível com os resultados experimentais em que foi observada uma grande diferença entre a qualidade superficial dos machos produzidos.

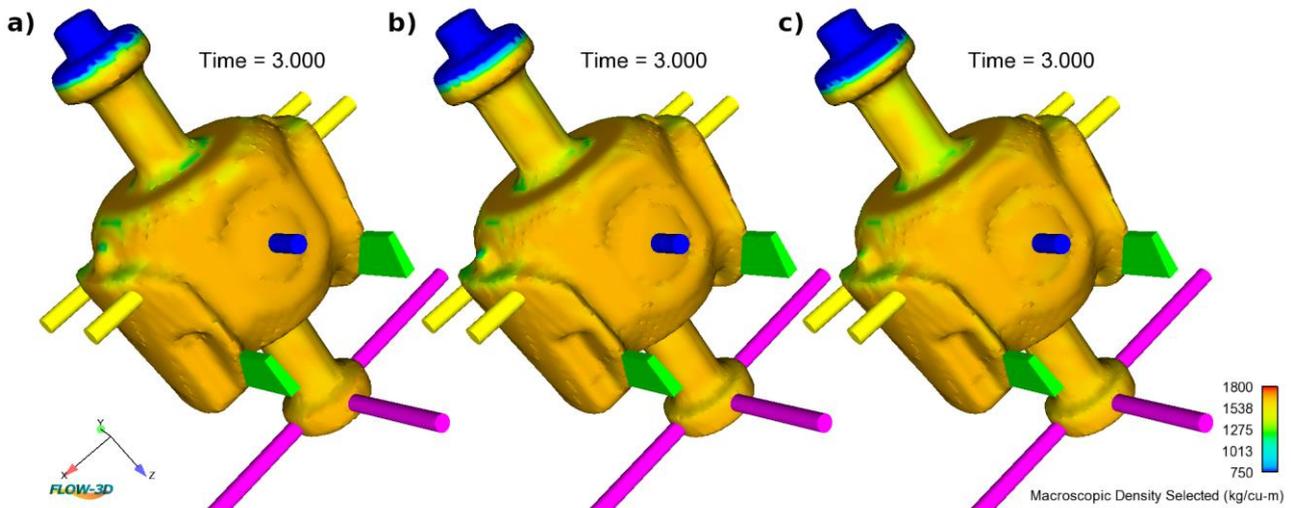


Figura 20 – Resultados obtidos, com o FLOW-3D, a diferentes pressões de injeção da areia, para uma dimensão de malha de 0,003 m: a) 2 kg/cm², b) 4 kg/cm², c) 6 kg/cm².

4.5.2. QuikCAST

Como já foi dito anteriormente, foram realizadas simulações, idênticas às abordadas acima, com o *software* QuikCAST. Para a análise dos resultados, foi utilizado o modo de visualização da fração volúmica da areia no macho. Assim, é possível perceber em que zonas o *software* afirma que poderá existir uma fração volúmica de areia inferior à do restante volume do macho e, por isso, uma maior probabilidade de existência de defeito. Além deste tipo de visualização foi ainda analisado o resultado que o programa fornece sobre possíveis zonas de acumulação de bolhas de ar e, por isso, de defeito, e ainda o tempo de enchimento de cada zona do macho.

Os resultados obtidos através do *software* QuikCAST estão patentes na Figura 21, encontrando-se repartidos por três colunas: na primeira, é possível observar a previsão de fração volúmica da areia em cada zona do macho; na segunda, observam-se a azul as zonas onde o *software* indicia a possibilidade de existência de bolhas de ar; na terceira, são apresentados os resultados obtidos para o tempo de enchimento de cada zona do macho. Cada linha corresponde a um valor de pressão de injeção diferente.

Ao contrário do que foi observado nas simulações realizadas no FLOW-3D, o QuikCAST prevê a existência de defeitos nas zonas correspondentes às obtidas experimentalmente, tanto na análise da fração volúmica, onde é possível observar zonas a amarelo e verde nas partes laterais do macho, como na análise da localização das bolhas de ar, que se encontram precisamente na zona do defeito observado. No entanto, também o QuikCAST aponta para a existência de problemas noutras zonas não problemáticas.

Comparando os resultados obtidos para diferentes pressões de injeção, apenas se observam ligeiras alterações nas zonas afetadas, podendo notar-se uma diminuição do tamanho das zonas problemáticas nas partes laterais do macho e uma mudança de cor, de

verde para amarelo, na análise da fração volúmica. No entanto, no caso da utilização da pressão de injeção de 6 kg/cm², parece haver um agravamento na zona superior do macho, onde não se observou qualquer alteração a nível experimental.

Relativamente à existência de bolhas de ar, estas parecem diminuir da simulação a 2 kg/cm² para as realizadas a pressões superiores, o que vai de encontro ao esperado. No entanto, a indicação de falta de enchimento na zona de injeção de areia, observada na simulação à pressão inferior, não se observou na prática.

No que diz respeito à previsão do tempo de enchimento, os resultados obtidos indicam que a zona superior do macho apenas se encontra completamente preenchida entre os 3 e os 5 segundos; no entanto, a realidade é que este enchimento ocorre sempre para valores inferiores a 3 segundos (tempo de injeção da areia utilizado no fabrico deste macho).

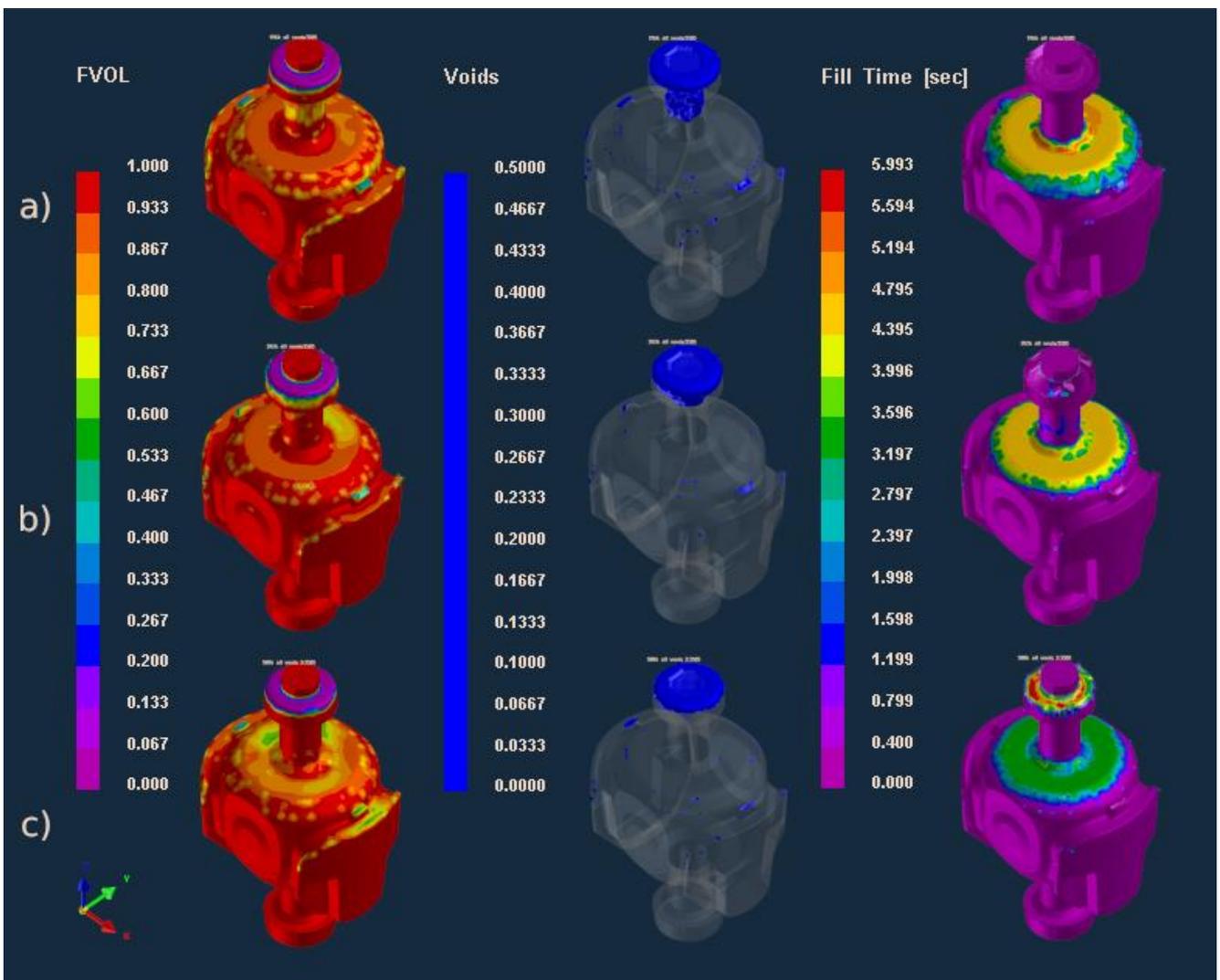


Figura 21 – Resultados obtidos, com o QuikCAST, a diferentes pressões de injeção da areia, usando todos os respiros: a) 2 kg/cm², b) 4 kg/cm², c) 6 kg/cm².

4.6. Comparação entre Simulações com diferentes Respiros em Funcionamento

Sendo a localização e o número de respiros utilizados numa determinada caixa de macho um fator determinante para o sucesso do seu desempenho, foi ainda testada a capacidade de os *softwares* preverem a localização de defeitos quando se altera o número de respiros e respetiva localização. Para isso, foram realizadas diferentes simulações para vários arranjos dos respiros existentes na caixa de macho usada no fabrico de machos.

4.6.1. FLOW-3D

Na Figura 22 apresentam-se os resultados obtidos nas simulações realizadas no FLOW-3D, tendo sido ativados e desativados os diferentes respiros; foi ainda realizada uma simulação sem qualquer respiro ativo.

Nos resultados obtidos, não se registaram praticamente diferenças na densidade do macho, independentemente do número e localização dos respiros. Apenas na simulação sem respiros, como seria de esperar, foi registada uma diferença significativa, não se tendo constatado o enchimento total do macho.

No entanto, seria de esperar que, ao retirar certos respiros da caixa do macho, se observasse um acréscimo de defeitos. Por exemplo, quando, no fabrico do macho, não se colocam respiros na parte lateral da caixa de macho, ocorre um deficiente enchimento e compactação, levando ao aparecimento de grandes defeitos nessa zona. Todavia, os resultados das simulações realizadas no FLOW-3D não conseguem prever o aparecimento destes defeitos, sendo os resultados obtidos todos iguais, independentemente do número e localização dos respiros.

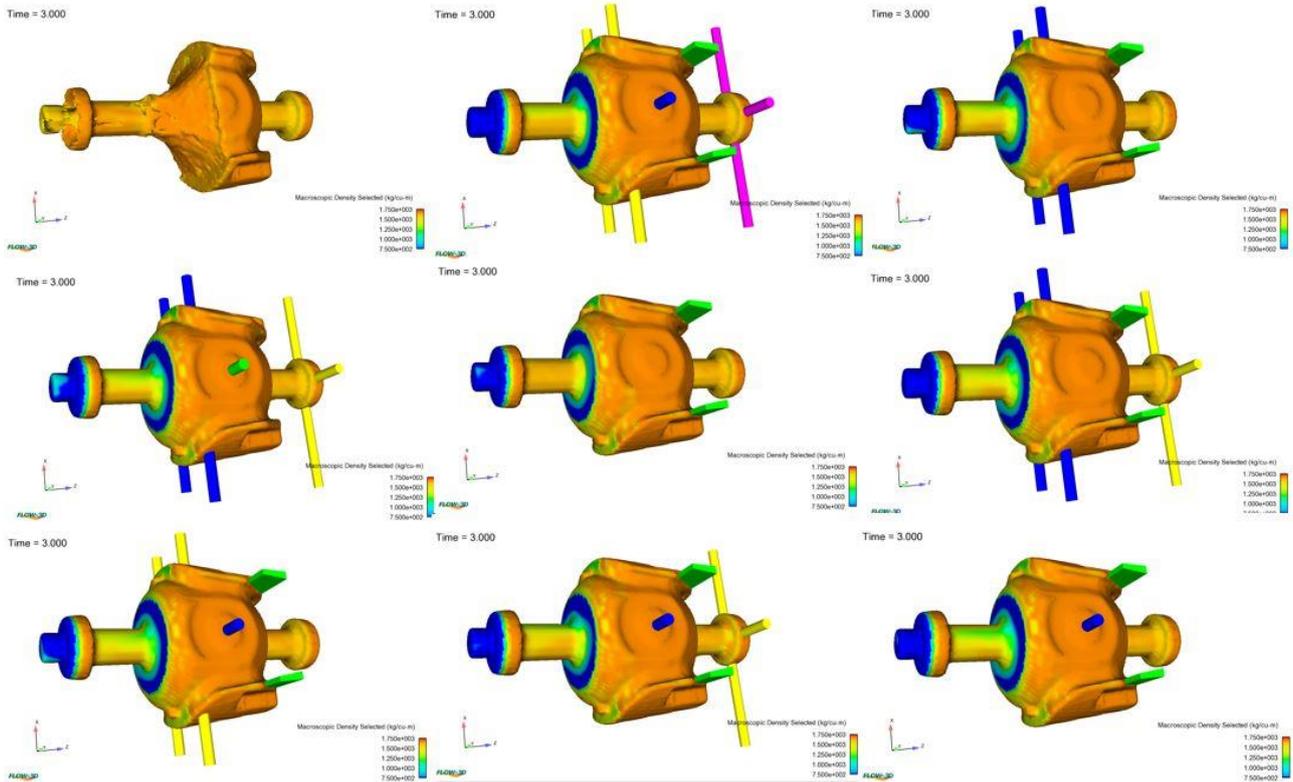


Figura 22 – Resultados obtidos, com o FLOW-3D, para diferentes configurações de respiros na caixa de macho.

4.6.2. QuikCAST

No QuikCAST, foi simulado o impacto promovido pela remoção dos respiros laterais da caixa de macho. Estes respiros têm por objetivo impedir o aparecimento de defeitos nessas zonas, causados por mau enchimento da caixa de macho. Assim, ao serem removidos, é esperado que os defeitos nessas zonas aumentem de dimensão. A configuração de respiros utilizada encontra-se representada na Figura 23.

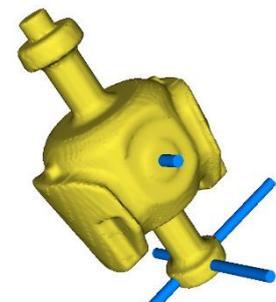


Figura 23 – Configuração de respiros utilizada.

Na Figura 24 encontram-se presentes os resultados obtidos nas simulações de enchimento do macho, no QuikCAST, para a configuração de respiros anteriormente apresentada, para diversas pressões de injeção. A observação dos resultados permite denotar um aumento da presença de bolhas de ar nas zonas onde se retiraram os respiros, assim como uma diminuição da fração volúmica da areia. Assim, os resultados obtidos no QuikCAST, ao contrário do que aconteceu com os resultados obtidos no FLOW-3D, vão de encontro ao esperado e ao que foi anteriormente explicado. No entanto, a fração volúmica na zona superior do macho continua a indicar a ocorrência de um problema, não se detetando o mesmo em termos das bolhas de ar. Quando comparamos os resultados para as

três pressões de injeção testadas, observamos que, tal como seria de esperar, o aumento da pressão de injeção reduz o impacto do defeito nas zonas laterais do macho.

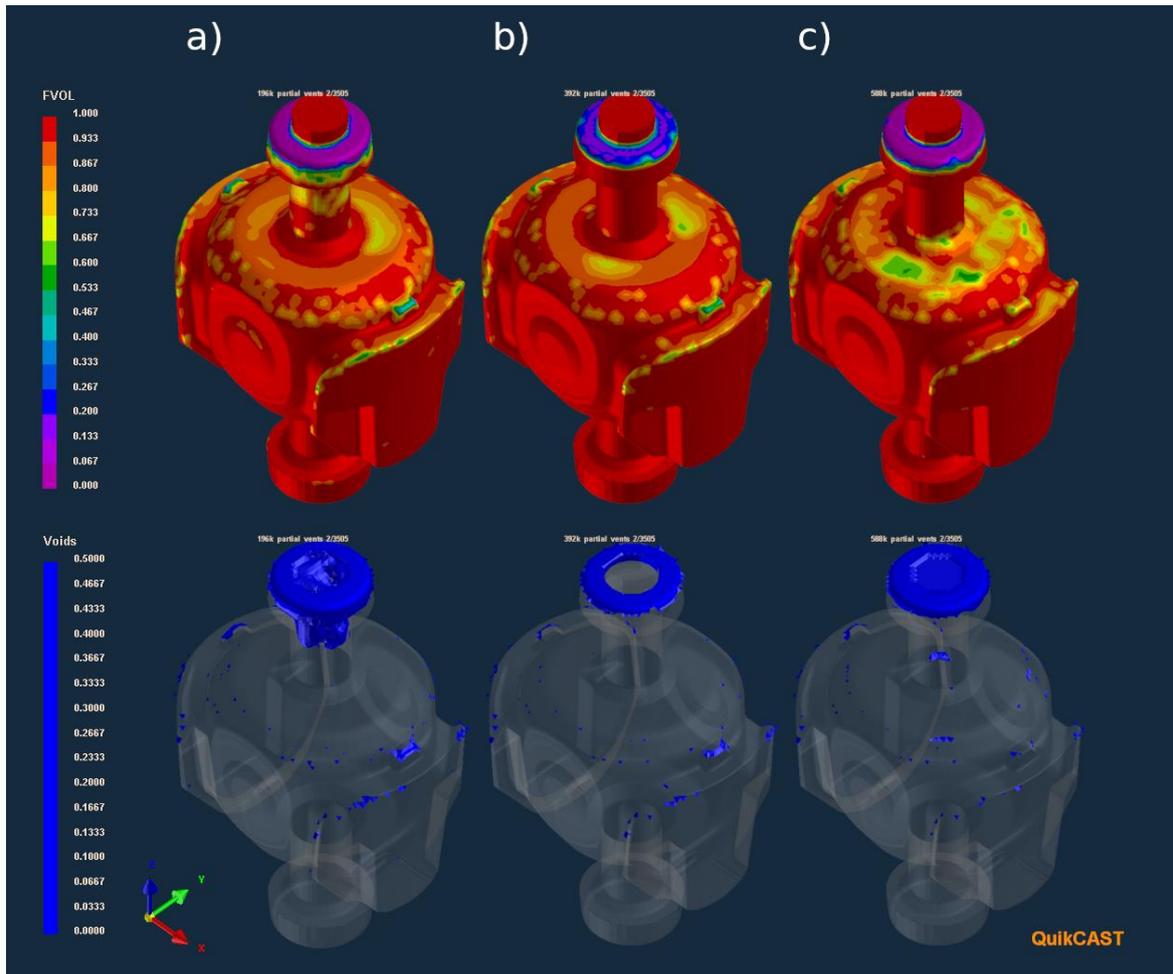


Figura 24 – Resultados obtidos, com o QuikCAST, a diferentes pressões de injeção da areia, usando todos os respiros patentados na Figura 23: a) 2 kg/cm², b) 4 kg/cm², c) 6 kg/cm².

Efetuarão-se ainda no QuikCAST simulações do enchimento da caixa de macho, na ausência de respiros, para três pressões de injeção distintas. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 25. Em nenhuma das simulações, não se registou, tal como era expectável, o total enchimento da caixa de macho. Efetivamente, como o ar não consegue escapar-se do interior da caixa de macho, o aumento da pressão de injeção condiciona ainda mais o seu enchimento.

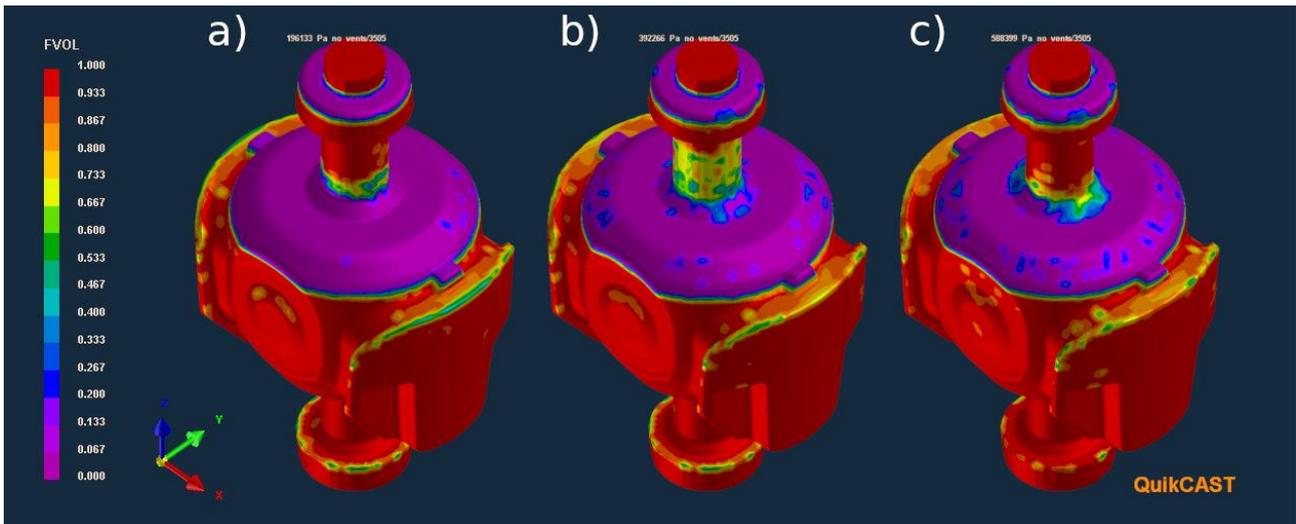


Figura 25 – Resultados obtidos, com o QuikCAST, a diferentes pressões de injeção da areia, na ausência de respiros: a) 2 kg/cm², b) 4 kg/cm², c) 6 kg/cm².

4.7. Simulação do Gaseamento do Macho

O *software* FLOW-3D permite ainda simular a etapa da injeção de amina a fim de promover a cura do ligante. Esta etapa é de extrema importância para o sucesso do fabrico do macho uma vez que, caso a mistura de areia e ligante já introduzida na caixa de macho, não sofra o processo de cura de forma adequada, a resistência do macho não será suficiente para que este possa ser utilizado na moldação.

Para proceder à configuração adequada do *software* para realizar este tipo de simulação, é necessário ativar o modo *Forchheimer Saturated Drag* em *Porous Media* no separador *Physics*. Neste separador, é preciso ativar novamente a *Density Evaluation* e o modo *Viscosity and Turbulence*. Neste modo, os respiros em vez de serem caracterizados como «*flow vents*» são definidos como «*holes*», sendo considerada a pressão atmosférica como a existente no seu exterior. Na zona do injetor, foi utilizada a pressão de injeção de 4 kg/cm² e um tempo de injeção de 4 segundos. Para caracterizar a amina, é ainda necessário adicionar a sua concentração, utilizando a opção *Scalar Concentration* (Figura 26). Para o efeito, foi aconselhado, pelo suporte do *software*, utilizar o valor de 10 kg/cm².

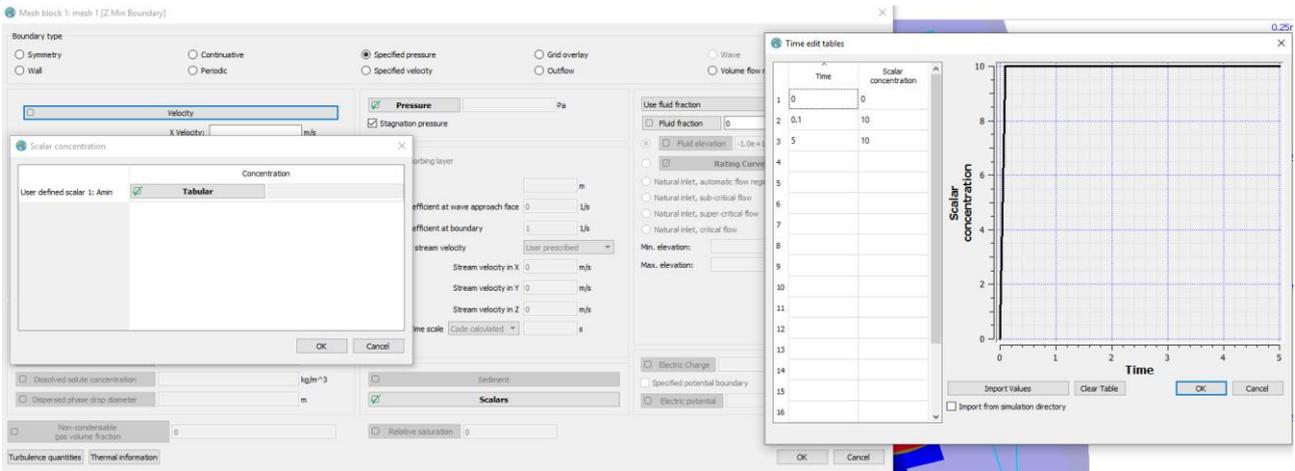


Figura 26 – Configuração da concentração da amina a ser injetada na caixa de macho.

Para este tipo de simulação, foram ensaiadas duas situações: uma, em que foram considerados todos os respiros existentes na caixa de macho, e outra, em que foram removidos os respiros presentes nas suas partes laterais (Figura 23). Nesta etapa do processo, a diminuição do número de respiros é benéfica pois impede que a amina seja temporaneamente expulsa do interior do macho antes que tenha ocorrido a devida cura da mistura. Deste modo, é de esperar que a diminuição do número de respiros favoreça a distribuição da amina pelo macho.

Os resultados da simulação no FLOW-3D podem ser apresentados segundo duas alternativas. A primeira assenta nos valores do peso específico (kg/m^3) da amina nas diversas zonas do macho (Figura 27). Tal como esperado, o macho, associado à caixa com a menor quantidade de respiros, apresenta uma densidade de amina, na maioria do seu volume, superior à obtida para o outro macho. No entanto, não é possível tirar grandes conclusões sobre se a quantidade de amina é ou não suficiente para promover a cura completa do macho, assim como não é dada qualquer informação sobre as zonas do macho mais propícias para a ocorrência de uma cura deficiente. Efetivamente, não sendo possível recolher qualquer informação sobre o tempo de contacto de uma determinada zona do macho com o catalisador, e atendendo a que a polimerização do ligante não é um processo instantâneo, torna-se difícil tirar qualquer conclusão sobre a potencial cura deficiente em certas zonas do macho.

.....

Time = 4.000

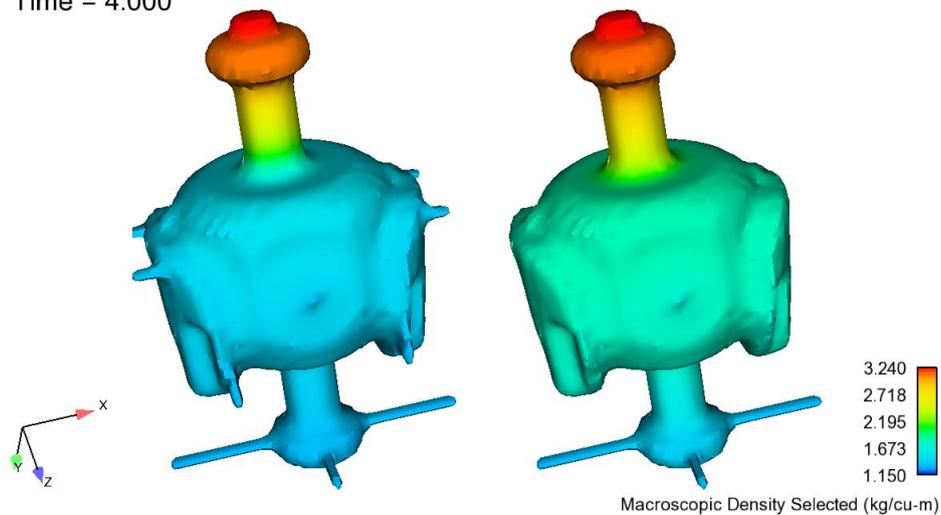


Figura 27 - Resultados obtidos, com o FLOW-3D, para o peso específico de amina, na etapa do gaseamento, no caso em que a caixa de macho apresenta todos os respiros (esquerda) e quando são removidos os respiros laterais (direita).

O segundo modo de visualização dos resultados, aconselhado pelo suporte do FLOW-3D, é a análise do tempo de residência do fluido em cada zona do macho (Figura 28). No entanto, a análise dos resultados obtidos não permite tirar qualquer conclusão uma vez que, por exemplo, no topo do macho este afirma que a amina não esteve lá nenhum tempo, não sendo isso verdade. Este resultado apenas seria útil caso informasse quanto tempo um determinado local do macho ficaria sobre a presença de amina; deste modo seria possível perceber se o tempo em que uma determinada zona do macho se encontra em contacto com a amina seria ou não suficiente para que este sofresse a cura convenientemente.

Este tipo de simulação apresenta ainda outro problema, pois não representa aquilo que efetivamente é executado na realidade. Nesta etapa do fabrico dos machos o que é feito é uma injeção prévia de amina gasosa durante 4 segundos, para o interior da caixa de macho, na mesma zona onde se encontra o injetor da areia; de seguida, é realizada a injeção de ar comprimido, na mesma zona, durante 15 a 30 segundos. Esta injeção de ar de varrimento tem como objetivo obrigar a amina a percorrer todo o volume do macho de modo a que a cura ocorra em todas as zonas, diminuindo assim o consumo específico de amina no fabrico do macho.

Deste modo, a utilização desta ferramenta nesta etapa torna-se inútil uma vez que não reflete aquilo que é realizado, e os resultados que fornece não são suficientes para ser possível retirar qualquer tipo de conclusão prática que ajude a melhorar o projeto de uma caixa de macho.

.....

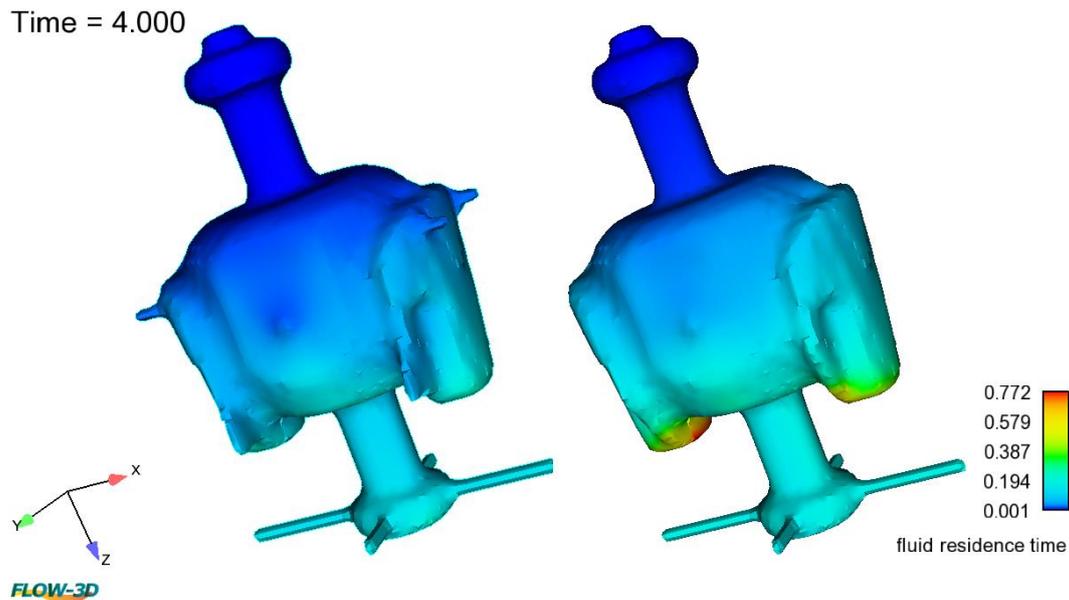


Figura 28 – Resultados obtidos, com o FLOW-3D, para o tempo de residência do fluido injetado (amina), na etapa do gaseamento, no caso em que a caixa de macho apresenta todos os respiros (esquerda) e quando são removidos os respiros laterais (direita).

4.8. Comparação entre as potencialidades dos Softwares de simulação do enchimento de caixas de macho

A possibilidade de utilização de dois *softwares* permitiu retirar algumas conclusões sobre as suas funcionalidades e capacidades. Deve assinalar-se que ambos os *softwares* têm como principal função a simulação de processos de fundição, sendo a simulação do enchimento de caixas de macho uma capacidade acessória.

O FLOW-3D afirma ser um *software* com capacidade de simular o enchimento de uma caixa de macho com areia, permitindo assim aos projetistas de uma caixa de macho otimizar o seu *design*, nomeadamente o número e localização dos respiros através dos quais escapa o ar. Todavia, os resultados obtidos não corroboram estas afirmações, demonstrando mesmo que o *software* não corresponde ao esperado, não permitindo prever qualquer tipo de defeito. Além disso, o FLOW-3D também não possibilita realizar qualquer tipo de otimização uma vez que o resultado quando se alterou o número e localização dos respiros foi sempre idêntico. Visto que a programação do *software* para este tipo de simulação foi sempre auxiliada pelo suporte prestado pelos representantes do programa, não é possível que exista um erro na mesma, uma vez que foi revista várias vezes pelo próprio suporte.

•••••

Relativamente aos resultados obtidos na etapa de gaseamento do macho, estes não permitem retirar qualquer tipo de conclusão que possibilite realizar algum tipo de otimização da caixa de macho ou do processo de fabrico. Deste modo, todos os objetivos de otimização do processo de fabrico de um macho ficam impossíveis de realizar com recurso ao FLOW-3D.

Por outro lado, os resultados obtidos nas simulações realizadas com recurso ao QuikCAST revelaram-se mais realistas quando comparadas com os alcançados com o FLOW-3D (Figura 29). Os resultados relativos ao enchimento da caixa de macho com os respiros na posição na qual se encontram na caixa de macho real, demonstravam a possibilidade de existência de defeitos nas zonas previstas. Além disso, quando comparamos os resultados a diferentes pressões, verifica-se uma redução do tamanho previsto do defeito, tal como aconteceu na experiência realizada na fábrica. Nas simulações realizadas sem os respiros laterais, os resultados obtidos foram, mais uma vez, mais credíveis do que os obtidos no FLOW-3D, observando-se um agravamento dos defeitos nas zonas onde se retiraram os respiros, tal como seria de esperar. Não obstante, apesar de mais próximos da realidade, estes resultados ainda apresentam pouca precisão para que seja viável utilizar este programa como ferramenta de otimização do *design* de uma caixa de macho ou do próprio processo de fabrico.

•••••

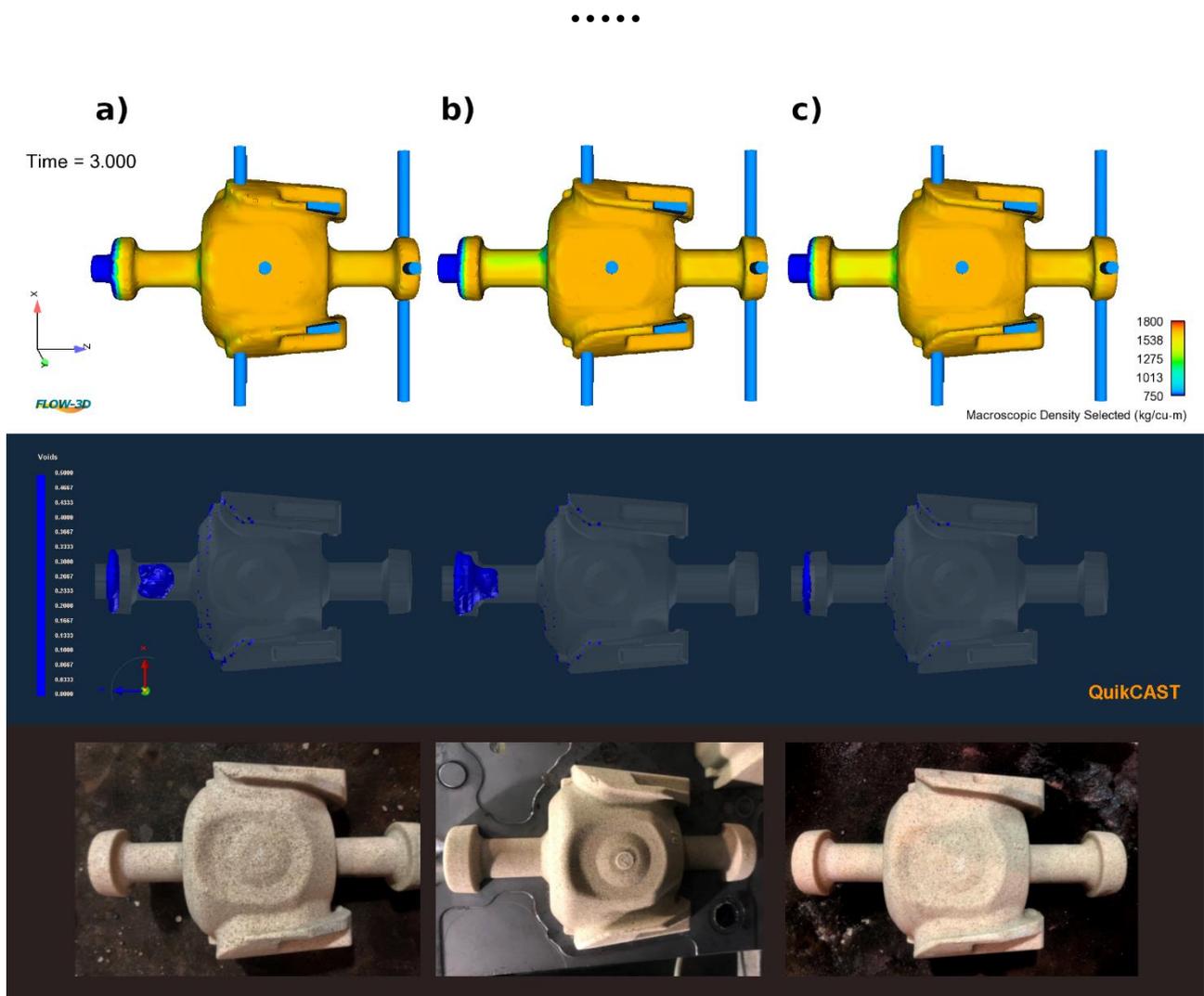


Figura 29 – Comparação entre os resultados das simulações com o FLOW-3D e o QuikCAST e os obtidos no fabrico dos machos, a diferentes pressões de injeção da areia: a) 2 kg/cm², b) 4 kg/cm², c) 6 kg/cm².

Deve ainda salientar-se a existência de outros dois programas disponíveis no mercado que permitem simular o enchimento de caixas de macho. No entanto, durante o decorrer desta dissertação, não foi possível experimentar qualquer um deles devido à inexistência de licenças administradas a parceiros da Faculdade, assim como ao seu elevado custo.

O MAGMA C+M é um *software* com um módulo exclusivamente dedicado ao fabrico de machos, que permite simular tanto o enchimento como o gaseamento da caixa de machos, com previsão de defeitos e de zonas mal curadas, assim como do tempo de vida da caixa de macho.

O Arena-flow é um programa exclusivamente desenvolvido para a simulação do fabrico de machos, tanto da etapa de enchimento como da de gaseamento. Como já foi referido anteriormente, apresenta um modelo de funcionamento totalmente diferente dos restantes *softwares* disponíveis no mercado, uma vez que trata a areia não como um fluido bifásico mas como grãos de areia individuais. Assim, este *software* permite avaliar: o fluxo de ar; a cura, pela amina ou pelo SO₂; a taxa de enchimento da caixa de macho; variações

•••••

de densidade no macho; o desgaste da ferramenta (caixa de macho); previsão da necessidade de resina; e distribuição do tamanho das partículas de areia. Permite ainda caracterizar a areia e a resina utilizada e avaliar a respetiva fluidez da mistura, bem como a ventilação da caixa de macho e o seu desempenho na compactação da areia. Diverge ainda dos restantes *softwares* pois toma em consideração mais variáveis tais como: o tipo de máquina utilizada; o tipo de areia; a distribuição granulométrica da areia; o tipo de resina; a fração de resina; a temperatura da amina; o tempo de mistura da areia e do ligante. Além destas diferenças, este *software* permite ainda simular o enchimento de vários machos ao mesmo tempo, como acontece na realidade devido ao facto da caixa de macho utilizada permitir produzir 10 machos por cada abertura realizada [25, 50, 51]. Deste modo, este *software* apresenta-se como o melhor *software* de simulação de fabrico de machos disponível no mercado. O seu elevado custo e reduzida divulgação torna difícil o seu acesso.

•••••

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho foi possível aprofundar os conhecimentos sobre a importância dos machos no setor da fundição, o método do seu fabrico, e as ferramentas a utilizar.

O processo de caixa fria, à base de uretano fenólico, é um método muito relevante nesta área, e o controlo das variáveis deste é de extrema importância para que sejam produzidos machos com a maior qualidade e a menor taxa de refugo possível. O *design* da caixa de macho apresenta-se como fator determinante para possibilitar o fabrico de machos de elevada qualidade, sendo a localização dos respiros a variável mais sensível.

Este trabalho permitiu ainda concluir que, como em qualquer outro tipo de simulação, a possibilidade de simulação do enchimento de uma caixa de macho constitui um enorme potencial em termos de otimização e de desenvolvimento e produção de machos. Esse potencial não se confina ao desenvolvimento da ferramenta – assegurando que esta funciona da melhor forma possível mesmo antes da dispendiosa produção da mesma –, mas também à deteção e prevenção de causas de potenciais defeitos ou erros.

Já são comercializados *softwares*, como o QuikCAST, o MAGMA C+M, o FLOW-3D, ou o Arena-flow, que procuram satisfazer esta necessidade de simular o processo de fabrico de um macho com vista à otimização do *design* da caixa de macho utilizada e dos parâmetros a utilizar no processo. No entanto, as simulações realizadas no âmbito desta dissertação com dois destes *softwares* – FLOW-3D e QuikCAST – não obtiveram o resultado desejado. De acordo com as simulações realizadas, o *software* FLOW-3D fica muito aquém das expectativas. Relativamente à etapa da injeção da areia, todas as simulações realizadas com recurso a este *software* obtiveram resultados inconclusivos; mesmo quando foram realizadas alterações na distribuição dos respiros, os resultados obtidos foram iguais entre si, não sendo possível assim retirar qualquer tipo de conclusões.

Os resultados obtidos no QuikCAST, embora sejam mais aproximados da realidade, não permitem ainda a utilização deste *software* como uma ferramenta de otimização do *design* de caixas de macho e do respetivo processo de fabrico. Este *software* deixa de parte diversas variáveis extremamente importantes para o sucesso no fabrico de machos tais como a distribuição granulométrica da areia utilizada ou a fração de resina na mistura.

Softwares como o MAGMA C+M e o Arena-flow apresentam-se como programas mais desenvolvidos para este tipo de simulação, sendo por isso duas alternativas ainda a ter em conta. Todavia, o elevado custo de cada um deles impossibilitou a sua utilização durante o decorrer desta dissertação. O Arena-flow é mesmo o único *software* disponível no mer-

.....

cado totalmente dedicado ao fabrico de machos, apresentando várias especificidades ignoradas pelos seus concorrentes. Apesar da impossibilidade da sua utilização, foram iniciadas conversações com o distribuidor do Arena-flow com o objetivo de vir a ser possível utilizar, em trabalhos futuros, este *software* para o desenvolvimento do *design* de caixas de macho e otimização dos processos de fabrico desses componentes com tão relevante importância em fundição.

.....

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como já foi mencionado, as simulações realizadas nos dois *softwares* utilizados não corresponderam às expectativas. No entanto, ambos os programas estão em constante evolução e desenvolvimento e, por isso mesmo, deve-se estar atento a novas atualizações que possam vir a melhorar os resultados obtidos neste tipo de simulações. A utilização de machos de outras geometrias e com volumes superiores também seria uma mais valia.

Como trabalho futuro seria interessante, caso fosse possível, desenvolver-se um trabalho idêntico a este mas com a utilização dos dois *softwares* disponíveis no mercado que não foram possíveis de explorar nesta dissertação: o MAGMA C+M e o Arena-flow.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. I. H. Committee, S. Lampman, C. Moosbrugger, E. DeGuire, and A. S. f. Metals, *ASM Handbook: Casting. Volume 15*, ASM International, 2008.
- [2] J. Brown, *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*, Elsevier Science, 2000.
- [3] J. Campbell, *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design*, Elsevier Science, 2011.
- [4] J. Sertucha and R. Suárez, *Arenas de Moldeo en Verde*, Durango, Azterlan Centro Metalúrgico de Investigación, 2009.
- [5] J. Sturm and I. Wagner, "Practical use of core simulation for process optimization", *Casting Plant & Technology* vol. 1, no. 2014, pp. 16-23, 2014.
- [6] M. Soft. (2017). *The Next Level of Casting, Coremaking Process Simulation*. Available: <https://www.foundrymag.com/simulationit/next-level-casting-coremaking-process-simulation>. Acedido em 2 de Novembro
- [7] F. S. D. GmbH. (2018). *Sand Core Making*. Available: <https://www.flow3d.com/modeling-capabilities/sand-core-making/>. Acedido em 2 de Novembro
- [8] F. Czerwinski, M. Mir, and W. Kasprzak, "Application of cores and binders in metal-casting", (in English), *International Journal of Cast Metals Research*, Review vol. 28, no. 3, pp. 129-139, May 2015.
- [9] M. Sahoo, S. Sahu, L. V. Whiting, and K. Sadayappan, "3.5 Chemically-Bonded Sand Molding & Coremaking Systems", in *Casting Copper-Base Alloys (3rd Edition)*: American Foundry Society, 2015.
- [10] S. I. Bakhtiyarov and R. A. Overfelt, "CFD modeling and experimental study of resin-bonded sand/air two-phase flow in sand coremaking process", (in English), *Powder Technology*, Article vol. 133, no. 1-3, pp. 68-78, Jul 2003.
- [11] K. Lochte, "Working with the Cold Box Process in the Coremaking Department of a Foundry", 1998, unpublished.
- [12] A. Grabarczyk, S. Dobosz, J. Kusinski, and K. Major-Gabrys, "The Tendency of Moulding Sands to Generate Core Cracks", (in English), *Archives of Foundry Engineering*, Article vol. 18, no. 1, pp. 157-161, 2018.
- [13] R. Danko, "Compaction of Cores Made by Blowing Methods - Model Investigations", (in English), *Archives of Foundry Engineering*, Article vol. 18, no. 2, pp. 191-197, 2018.
- [14] P. Beeley, "8 - Production techniques 1 the manufacture of sand castings", in *Foundry Technology (Second Edition)*, P. Beeley, Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, pp. 443-546.
- [15] A. M., J. Danko, R. Danko, A. Fedoryszyn, and T. Fulko, "Conceptual Design of a Core Making System", *Archives of Foundry Engineering*, vol. 13, no. 1/2013, pp. 13-16, 2013.
- [16] M. Gwyn, "Designing for Economical Coring", in *Casting Design and Performance*: ASM International, 2009.

- [17] J. Danko, J. Zych, and R. Danko, "Diagnostic Methods of Technological Properties and Casting Cores Quality", (in English), *Archives of Metallurgy and Materials*, Article vol. 54, no. 2, pp. 381-392, 2009.
- [18] A. Josan, C. P. Bretotean, S. Ratiu, E. Ardelean, and M. Ardelean, "Research on the influence of moulding-casting technology on the quality of castings", in *Innovative Ideas in Science 2016*, vol. 200, L. D. Lemle, Ed. (IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, Bristol: Iop Publishing Ltd, 2017.
- [19] R. Danko, "Investigations of the Mechanism of the Sand Shooting into the Core Box", *Archives of Foundry Engineering*, Article vol. 18, no. 3, pp. 113-119, 2018.
- [20] J. C. Sturm and I. Wagner. (2012). *Real-World Application of Core Simulation for Process Optimization*. Available: <https://www.magmaflow.de/de/loesungen/stahl-guss/publikation/real-world-application-of-core-simulation-for-process-optimization>. Acedido em 5 de novembro de 2018
- [21] A. Kumar, M. P. Poonia, U. Pandel, and A. S. Jethoo, "FMEA: Methodology, Design and Implementation in a Foundry", *International Journal of Engineering Science & Technology*, vol. 3, no. 6, pp. 5288-5297, 2011.
- [22] C. J. Ni *et al.*, "Influence of core box vents distribution on flow dynamics of core shooting process based on experiment and numerical simulation", (in English), *China Foundry*, Article vol. 13, no. 1, pp. 22-29, Jan 2016.
- [23] C. Ni, G. Lu, T. Jing, and J. Wu, "Flow Dynamic Analysis of Core Shooting Process through Experiment and Multiphase Modeling", *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016, p. 12, 2016, Art. no. 2317180.
- [24] R. Danko, "Studies of the Influence of the Number and Distribution of Vents on the Production Process of Cores by the Blowing Method", (in English), *Archives of Metallurgy and Materials*, Article vol. 63, no. 1, pp. 105-111, 2018.
- [25] C. Nowaczyk, "Core Shooting Simulation - to the Economic and Environmental Advantage of the Foundry", *The Journal of The Institute of Cast Metals Engineers*, vol. 189 no. 3722, pp. 44-45, 20115.
- [26] T. Vijayaram and P. Piccardo, "Computers in Foundries", *Metallurgical Science and Technology*, vol. 30, no. 2, pp. 28-38, 2012.
- [27] J. Tu, G.-H. Yeoh, and C. Liu, "Chapter 1 - Introduction", in *Computational Fluid Dynamics (Second Edition)*, J. Tu, G.-H. Yeoh, and C. Liu, Eds.: Butterworth-Heinemann, 2013, pp. 1-29.
- [28] R. Boardman. (2006). *Discretisation*. Available: <https://www.southampton.ac.uk/~rpb/thesis/node33.html>. Acedido em 4 de abril de 2019
- [29] MediaWiki. (2013). *General CFD FAQ*. Available: https://www.cfd-online.com/Wiki/General_CFD_FAQ. Acedido em 2 de Maio de 2019
- [30] M. A. A. Khan and A. K. Sheikh, *A Comparative Study of Simulation Software for Modelling Metal Casting Processes*, 2018, pp. 197-209.
- [31] G. R. Liu and S. S. Quek, "3 - Fundamentals for finite element method", in *Finite Element Method*, G. R. Liu and S. S. Quek, Eds. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, pp. 35-66.
- [32] Arena-flow, "Arena-flow Users Guide", 2006, unpublished.

- [33] D. Lefebvre, A. Mackenbrock, V. Vidal, V. Pavan, and P. M. Haigh, "Development and use of simulation in the design of blown cores and moulds", *Foundry Trade Journal*, vol. 179 no. 3621 pp. 17-20, 2008.
- [34] M. Schneider and R. Stevenson, "Simulation of the Entire Core Production Process", *Transactions of the American Foundry Society*, vol. 120, no. 2012, pp. 23-32, 2012.
- [35] R. Danko and L. Jamrozowics, "Density Distribution and Resin Migration Investigations in Samples of Sand Core Made by Blowing Method", *Journal of Casting & Materials Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 70-73, 2017.
- [36] A. Fedoryszyn and R. Danko, "Examination of parameters influencing the outflow of the Two-Phase Sand-Air Stream in the Blowing Process", (in English), *Archives of Metallurgy and Materials*, Article vol. 58, no. 3, pp. 903-906, 2013.
- [37] G. H. Ristow, "Granular Dynamics: a Review about Recent Molecular Dynamics Simulations of Granular Materials", *Annual Reviews of Computational Physics* vol. 1, no. 1994, pp. 275-308, 1994.
- [38] D. Gidaspow, "One-Dimensional Steady Gas-Solid Flow", in *Multiphase Flow and Fluidization*, D. Gidaspow, Ed. San Diego: Academic Press, 1994, pp. 31-60.
- [39] C. W. Hirt, "A Continuum Model for High Concentration Granular Media: Illustrated by Application to Sand Core Blowing", *Flow Science Report*, vol. 10, no. 2, pp. 1-23, 2010.
- [40] C. W. Hirt, "A FLOW-3D Continuum Model for Granular Media", *Flow Science Report*, vol. 13, no. 02, pp. 1-18, 2014.
- [41] C. W. Hirt, "Scale Analysis of Two-Fluid Relative Velocity Equation", *Flow Science, Inc. Technical Note*, vol. TN77, 2007.
- [42] J. M. Brethour and C. W. Hirt, "Drift Model for Two-Component Flows", *Flow Science, Inc. Technical Note*, vol. TN83, 2009.
- [43] A. Flow. (2018). *About Us*. Available: https://www.arena-flow.com/about_us.html. Acedido em 3 de janeiro de 2019
- [44] D. M. Snider, *An Incompressible Three-Dimensional Multiphase Particle-in-Cell Model for Dense Particle Flows*, *Journal of Computational Physics*, Vol. 170, no. 2, 2001, pp. 523-549.
- [45] D. Snider, K. Williams, J. Robert Torczynski, T. John Ohern, and S. Mathew Trujillo, *Multiphase Particle-in-Cell Simulations of Flow in a Gas-Solid Riser*, 2004.
- [46] P. J. Blaser, D. M. Snider, K. Williams, A. E. Cook, and M. Hoover, *Process Modeling: Lost-Foam Pattern Filling*, *Journal of Computational Physics*, vol. 15, 2004.
- [47] E. ToolBox. (2003). *Air - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient at Varying Temperature and Constant Pressures* Available: https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html. Acedido em 21 de fevereiro de 2019
- [48] I. Flow Science, "Flow-3D Documentation: Granular flow application example: Core Blowing", 2016, unpublished.
- [49] S. Pannala, M. Syamlal, and T. J. O'Brien, *Computational Gas-Solids Flows and Reacting Systems: Theory, Methods and Practice: Theory, Methods and Practice*, Hershey, PA, United States, Engineering Science Reference, 2010.

.....

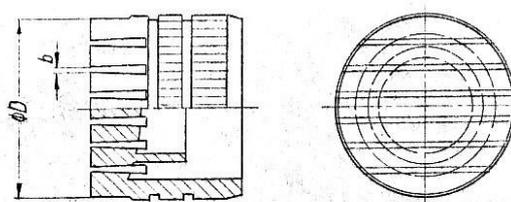
- [50] ASK-Chemicals. (2018). *Arena-flow - Windows-based application*. Available: <http://www.ask-chemicals.com/foundry-products/services/design-services/arena-flowr-software/arena-flow-for-windows.html>. Acedido em 3 de janeiro de 2019
- [51] Arena-Flow. (2018). *Core Making*. Available: <https://www.arena-flow.com/technology.html>. Acedido em 3 de janeiro de 2019

.....

ANEXOS

Anexo A – Tipos de respiros utilizados

| Diâmetro do respiro (mm) | Área útil do respiro (mm ²) |
|--------------------------|---|
| 8 | 7 |



| Größe mm | Zoll | ØD | Schlitz Anzahl | Luft — durchlässige Fläche/mm ² | |
|-------------|------|-------|-------------------|--|-------|
| | | | | b | b |
| 3 | | 3 | 2 | 17,5 | 12 |
| 4 | 1/8 | 3,17 | 2 | 18 | 12 |
| 5 | | 4 | 3 | 3 | 2,0 |
| 6 | 3/16 | 4,76 | 3 | 3,8 | 2,45 |
| 7 | | 5 | 3 | 4 | 2,7 |
| 8 | | 6 | 4 | 6,2 | 4,1 |
| 9 | 1/4 | 6,35 | 4 | 6,7 | 4,5 |
| 10 | | 7 | 4 | 7,7 | 5,1 |
| 11 | | 8 | 5 | 10,6 | 7,0 |
| 12 | 3/16 | 7,93 | 5 | 11,5 | 8,9 |
| 13 | | 9 | 5 | 11,7 | 7,8 |
| 14 | 3/8 | 9,52 | 6 | 15,1 | 10,0 |
| 15 | | 10 | 6 | 16 | 10,7 |
| 16 | 1/2 | 11,11 | 6 | 19,4 | 13,8 |
| 17 | | 12 | 7 | 22,7 | 15,1 |
| 18 | | 12,7 | 7 | 23,3 | 16,0 |
| 19 | | 13 | 7 | 24,8 | 16,5 |
| 20 | | 14 | 8 | 30,4 | 20,3 |
| 21 | | 15 | 8 | 33 | 22,0 |
| 22 | 3/8 | 15,87 | 9 | 38,5 | 25,5 |
| 23 | | 16 | 9 | 38,8 | 25,8 |
| 24 | | 18 | 10 | 43,4 | 32,2 |
| 25 | 3/4 | 19,05 | 11 | 56,7 | 37,25 |
| 26 | | 20 | 11 | 59,6 | 39,8 |
| 27 | 7/8 | 22,2 | 11 | 69,8 | 43,2 |
| 28 | | 22 | 11 | 69,4 | 43,5 |
| 29 | | 25 | 11 | 69,9 | 46,2 |
| 30 | 1 | 25,4 | 11 | 70,5 | 46,4 |
| 31 | | 26 | 11 | 73,5 | 48,2 |
| 32 | | 30 | 13 | 97,9 | 65,3 |
| 33 | | 40 | 17 | 171,6 | 114,5 |

Stück: *Be* Benennung und Abmessung: *Schlitzdüsen* Teil: *Ø 3 bis 40* Werkstoff: *Ø 1/8 bis 1"* DIN: Datum: Änderung: Name:

gepr. Datum: *22.4.71* Ersetzt für: Ersetzt durch:

Maßstab: Zeichnungs-Nr.: *1-1284*

Luft durchlässige Fläche/mm² (b): *Q3*

Luft durchlässige Fläche/mm² (b): *Q2*