

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ROBSON RODRIGUES

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO DE
METAL LÍQUIDO NAS CAVIDADES DE UM MOLDE DE INJEÇÃO**

CAXIAS DO SUL

2014

ROBSON RODRIGUES

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO DE
METAL LÍQUIDO NAS CAVIDADES DE UM MOLDE DE INJEÇÃO**

Relatório de Estágio II apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como pré-requisito para a conclusão do curso.

Orientador: Prof. Sandro Tomaz Martins, MSc.

CAXIAS DO SUL

2014

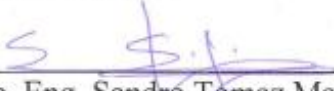
ROBSON RODRIGUES

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO DE
METAL LÍQUIDO NAS CAVIDADES DE UM MOLDE DE INJEÇÃO**

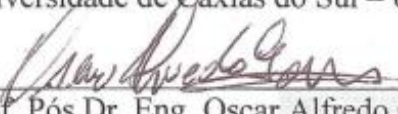
Relatório de Estágio II apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como pré-requisito para a conclusão do curso.

Aprovado em 06/11/2014

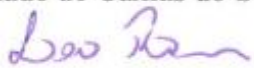
Banca Examinadora



Prof. Me. Eng. Sandro Tomaz Martins
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Pós Dr. Eng. Oscar Alfredo Garcia de Suarez
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Pós Dr. Eng. Leonardo Machado da Rosa
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

O presente trabalho do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul tem como objetivo a análise computacional do escoamento de ZAMAC líquido em um molde de injeção sob pressão, destinado à injeção de peças decorativas. Esta é uma análise para otimização do projeto de canais de injeção. A análise foi executada através da utilização do método dos volumes finitos, sendo utilizado para isso um software de uso comercial. É abordada uma revisão bibliográfica sobre mecânica dos fluidos, explicando como o software interpreta o domínio proposto e as equações gerais utilizadas pelo mesmo na resolução do problema de escoamento. A investigação experimental é feita através de metalografia e análise de porosidade nas amostras, com o objetivo de quantificar e comparar o projeto otimizado. É possível observar a mudança de percentual de porosidade com o escalonamento do canal e a suavização do escoamento para o interior das cavidades, minimizando a recirculação de material durante o preenchimento, reduzindo os defeitos gerados no produto final.

Palavras-chaves: Método dos volumes finitos. Mecânica dos fluidos computacional. Fundição sob pressão.

ABSTRACT

This work in Mechanical Engineering, from the University of Caxias do Sul, aims to study the computational analysis of the liquid ZAMAC yield into an injection mold under pressure, intended for decorative pieces injection, focusing on design optimization of injection canals. The analysis was performed by employing the method of finite volume, using a software of commercial use for that. A literature review of the fluid dynamics was carried out to explain how the software interprets the proposed domain and the general equations used in solving the fluid flow problem. The experimental investigation is made by metallography and analysis of porosity in the specimen in order to quantify and compare the optimized model. It is possible to observe the change of percentage of porosity with the scaling and smoothing of the canals flow to the recesses, thereby minimizing the recirculation of material during the filling, reducing defects generated in the final product.

Keywords: Finite volume method. Computational fluid dynamics (CFD). Die casting under high pressure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Rebite para calças jeans, RB4.080.01.Z.....	14
Figura 2 – Seção transversal de uma injetora de câmara quente.....	17
Figura 3 – Sequência de fundição sob pressão em câmara quente.....	18
Figura 4 – Tipos de malhas.....	25
Figura 5 – Malha ortogonal.....	25
Figura 6 – Malha não ortogonal.....	25
Figura 7 – Volume de controle em coordenadas retangulares.....	26
Figura 8 – Modelo 1.....	32
Figura 9 – Defeito em rebites.....	32
Figura 10 – Fluxograma método de análise pelo Magmasoft.....	33
Figura 11 – Malha.....	35
Figura 12 – Etapas do preenchimento do molde.....	36
Figura 13 – Gráficos gerados pelo software.....	36
Figura 14 – Modelo 2, vista A (placa móvel) e vista B (placa fixa).....	37
Figura 15 – Velocidade, escala de 30 a 100 m/s, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).....	38
Figura 16 – Velocidade, escala de 0 a 100 m/s, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).....	39
Figura 17 – Linhas de corrente, canal principal, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).....	40
Figura 18 – Linhas de corrente, canais de ataque, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).....	40
Figura 19 – Velocidade em escala de 0 a 100 m/s, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).....	41
Figura 20 – Redução da área de ataque.....	42
Figura 21 – Rebarbas de <i>gate</i>	42
Figura 22 – Áreas de ataque, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).....	42
Figura 23 – Preenchimento da peça, modelo 1 (A).....	43
Figura 24 – Preenchimento, modelo 2 (B).....	43
Figura 25 – Escape de gases, modelo 2 (B).....	43
Figura 26 – Placa das marcas, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).....	44
Figura 27 – Techmire 24NTX.....	44
Figura 28 – Seções de corte para análise, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).....	45
Figura 29 – Embutimentos, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).....	45
Figura 30 – Modelo 1 a 65,38 mm de distância do ponto de injeção.....	46
Figura 31 – Modelo 2 a 65,38 mm de distância do ponto de injeção.....	46
Figura 32 – Gráfico percentual de porosidade x distância do ponto de injeção.....	47

Figura 33 – Modelo 1 à distância de 47,38 mm do ponto de injeção.....	47
Figura 34 – Modelo 2 à distância de 47,38 mm do ponto de injeção.....	48
Figura 35 – Modelo 1 (A) e modelo 2 (B) – 500x.....	48
Figura 36 - Modelo 2, início do canal (A) e no final (B) – 500x.	49
Figura 37 - Modelo 1, regiões da microestrutura – 500x.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química das ligas de zinco para fundição.	19
Tabela 2 – Propriedades das principais ligas de zinco.	20
Tabela 3 – Quantidade produzida x refugo.	50

LISTA DE SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
FSP	Fundição Sob Pressão
MVF	Método dos Volumes Finitos
NBR	Norma Brasileira
ZAMAC	Liga de Zinco, Alumínio, Magnésio, Cobre
VC	Volumes de Controle
STL	<i>Stereo Lithography</i>
ZA	Zinco Alumínio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	AMBIENTE E ÁREA DO ESTÁGIO	13
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	14
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO.....	16
2.1.1	Principais Vantagens	16
2.1.2	Principais Desvantagens.....	17
2.1.3	Injetoras de Câmara Quente	17
2.2	CARACTERIZAÇÃO DA LIGA UTILIZADA NO FUNDIDO	18
2.2.1	Tipos de Ligas de Zamac.....	19
2.3	DEFEITOS DE INJEÇÃO	21
2.3.1	Porosidade Gasosa	21
2.3.2	Bolhas.....	21
2.3.3	Junta fria	22
2.4	COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS	22
2.5	MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	23
2.5.1	Malhas Numéricas	24
2.5.2	Equações Governantes	25
2.5.3	Conservação de massa total	27
2.5.4	Conservação de quantidade de movimento	27
2.5.5	Conservação de energia.....	28
2.5.6	Solidificação.....	28
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	31
3.1	INTRODUÇÃO	31
3.2	ANÁLISE DO MODELO ATUAL	31
3.2.1	Materiais e métodos.....	33
3.3	PROPOSTA E RESULTADOS	37
3.3.1	Investigação Experimental.....	43
4	CONCLUSÃO.....	51

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
APÊNDICE 1 – MALHA DE PROJETO DE CANAIS 1.....	55
APÊNDICE 2 – CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS	56
APÊNDICE 3 – PERSPECTIVA DE GEOMETRIA	57
APÊNDICE 4 – LADO FIXO DO MOLDE	57
APÊNDICE 5 – LADO MÓVEL DO MOLDE	58
APÊNDICE 6 – DIMENSÕES DOS VOLUMES DE CONTROLE	58
APÊNDICE 7 – PARÂMETROS DE CICLO	59
APÊNDICE 8 – ACIONAMENTO DO CILINDRO E PISTÃO DE INJEÇÃO	60
APÊNDICE 9 – PARÂMETROS DA MÁQUINA	61
APÊNDICE 10 – PLACA DAS MARCAS MODELO 1.....	62
APÊNDICE 11 – PLACA INFERIOR MODELO 1	63
APÊNDICE 12 – PLACA DAS MARCAS MODELO 2	64
APÊNDICE 13 – PLACA INFERIOR MODELO 2	65
APÊNDICE 14 – PARÂMETROS DE INJEÇÃO PARA OS TESTES	66
APÊNDICE 15 – TABELAS DE PERCENTUAL DE POROSIDADE X DISTÂNCIA DO PONTO DE INJEÇÃO	67

1 INTRODUÇÃO

"O processo de fundição de metais, cujo início se deu ainda na época pré-histórica, possui por características básicas a fusão de metais e vazamento dos mesmos em moldes, com a finalidade de produzir as formas básicas requeridas, através de diferentes métodos de fundição, numa infinidade de produtos" (KONDIC, 1973). Pode-se dizer que o processo de fundição de metais possui uma importância relevante para o cotidiano das pessoas, como maçanetas de portas, torneiras, registros de água, etc.

A indústria de fundição está constantemente em busca de inovação. Além do aumento das demandas econômicas, especialmente em relação à mão de obra e de recursos materiais, atendendo à qualidade do produto e tempo de entrega. O processo, por possuir muitas variáveis, exigir peças técnicas por parte dos clientes e a forte concorrência, levou muitas empresas a adotar tecnologias de auxílio aos processos e no desenvolvimento do projeto e fabricação do molde para tornarem-se competitivas no mercado com um produto final com qualidade e custo atrativo, este que está diretamente associado aos custos de fabricação.

A competitividade das empresas de fundição de metais do Brasil pode ser afetada pelo elevado tempo de fabricação e, portanto, entrega dos produtos. O processo adotado pela maior parte das empresas do ramo é o tradicional tentativa e erro, o qual não está de acordo com a posição de empresas internacionais, onde o projeto e elaboração do molde é um processo crucial no desenvolvimento de novos produtos. É neste momento em que um estudo, seguido de planejamento bem elaborado, é necessário, pois podemos alterar e adaptar novas ideias, evitando custos superiores, posteriormente com retrabalhos e atrasos.

Métodos experimentais trabalham com a configuração real do problema e podem ser executados na ausência de modelos matemáticos, porém exigem alto custo e tempo. Para auxiliar na tomada de decisões conta-se com a ajuda da simulação computacional. Segundo Pegden (1990), "a simulação é um processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação". Ela garante não apenas melhores desempenhos, como também evita gastos com futuras medidas corretivas.

Nas últimas décadas, as simulações computacionais vêm adquirindo crescente importância em, praticamente, todas as áreas de engenharia. Ao longo da maioria dos processos de desenvolvimento de novos produtos, uma redução considerável de custo, tempo e recursos consumidos em ensaios e testes experimentais pode ser obtida com a utilização de simulações numéricas. Isso significa que o produto completo deve ser modelado e seu comportamento simulado. Tal simulação deve considerar não apenas estruturas complicadas, mas também uma combinação de diferentes fenômenos físicos e escalas. Portanto, mesmo com o impressionante poder computacional disponível atualmente, ainda assim, é uma tarefa desafiadora desenvolver e implementar rápidos métodos numéricos capazes de resolver problemas multifísicos e de multiescala com um alto grau de confiança e precisão. Diversos problemas reais de engenharia são sistemas que sempre envolvem a interação e acoplamento de diferentes domínios físicos (tais como: transferência de calor, elasticidade, fluidodinâmica, eletromagnetismo, eletroquímicos etc.), o que não é uma tarefa simples, inclusive se efeitos de não linearidades precisarem ser levados em consideração. (PEREIRA, 2009)

A descrição do processo de fundição em um modelo matemático exigiu a quantificação dos parâmetros e processos, com o objetivo de analisar o impacto de cada variável na qualidade do fundido. A ideia de utilizar modelos matemáticos para prever o preenchimento e solidificação partiu da necessidade de engenheiros mecânicos de compreender e aperfeiçoar o projeto de moldes.

1.1 AMBIENTE E ÁREA DO ESTÁGIO

O estágio foi realizado na empresa Mundial S.A., localizada na cidade de Caxias do Sul no bairro São Ciro. A empresa possui atualmente várias divisões, sendo elas: *Personal Care*, *Creative*, *Eberle Fashion*, *Hércules Gourmet*, *Syllent* e *Impala*. Fundada em 1896, atua diretamente no mercado têxtil desde 1974, produzindo botões, ilhoses, rebites, fivelas, etiquetas, entre outros. Possui aproximadamente 950 colaboradores, ocupa área construída de 24.948 metros quadrados, o sistema de gestão da qualidade está em conformidade com os requisitos da norma NBR ISO 9001:2008 e possui receita líquida anual de R\$ 176 milhões.

As atividades de estágio foram desenvolvidas na divisão *Eberle Fashion*, no setor de engenharia de projetos, que é responsável por qualquer alteração e criação de ferramental novos, envolvendo o setor de injeção de zamac, constituído de 40 injetoras, sendo estas divididas em 9 máquinas injetoras modelo *Techmire*, 31 modelo *LK Machinery* e 10 modelos *Evolution*, podendo receber ferramentas com até 4 movimentos, para peças mais complexas. Cada molde possui em média 6 cavidades para peças com peso aproximado de 8 gramas cada,

podendo chegar a 20 cavidades para peças menores, com peso de 0,5 gramas por peça. A base da ferramenta é aproveitada para produção de vários itens da mesma família, mudando apenas a parte superior onde se encontra a maior parte da cavidade do produto a ser injetado, onde é acrescentada a marca do cliente. Neste setor também é executado o desganhamento, separando as peças injetadas dos canais de alimentação e o tamboreamento, retirando qualquer rebarba que tenha ficado presa à peça.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

No processo produtivo atual, existem perdas relacionadas à produção de peças com defeito que geram reclamações de clientes internos ou externos. Quando são detectadas antes do envio ao cliente, necessitam de etapas de retrabalho ou simplesmente sucateamento do lote e nova injeção, voltando ao início do processo, gerando atraso na entrega produto.

A maioria dos lotes com defeito originada no setor de injeção de zamac deve-se a peças injetadas com bolhas na superfície do produto e, dificilmente, são recuperáveis, levando a perda de todo o lote. Isso justifica a revisão do modelo atual de canais de injeção, por se tratar de uma importante variável no processo de FSP (Fundição Sob Pressão) e por não ter um padrão associado a este tipo de peça nos projetos atualmente. A Figura 1 mostra a superfície defeituosa do rebite RB4.080.01.Z injetado nos atuais moldes.

Figura 1 – Rebite para calças jeans, RB4.080.01.Z.



Fonte: Mundial S/A (2014).

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo a análise do escoamento de metal líquido (ZAMAC) em um molde de injeção sob pressão, visando reduzir o problema de sucateamento de peças devido a bolhas de ar, procurando analisar o atual sistema de canais de injeção, identificar as possíveis causas do defeito e propor a otimização do mesmo, determinando parâmetros para construção dos canais de injeção.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho podem ser verificados abaixo:

- Revisão da bibliografia de mecânica dos fluidos;
- Analisar as equações que regem a simulação do software Magma;
- Caracterizar a liga utilizada;
- Analisar o escoamento do atual sistema de canais;
- Identificar os possíveis problemas que afetam a qualidade das peças;
- Propor mudanças de dimensionamento dos canais;
- Realizar testes práticos;
- Comparar a porosidade nos modelos, através de análise gráfica;
- Analisar o comportamento dos lotes produzidos com este novo conceito, em relação ao percentual de peças sucateadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo é apresentada, com base em obras e artigos dos principais autores, a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho. São abordados os conceitos sobre fundição sob pressão, caracterização da liga utilizada, *computational fluid dynamics* (CFD), método dos volumes finitos, escoamento de fluidos e defeitos de fundição.

2.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO

Segundo Malavazi (2005), o processo de fundição sob pressão (FSP) consiste em injetar um metal líquido contido em um recipiente para o interior da cavidade de um molde, submetendo o metal a altas pressões. O processo é dividido em dois tipos, de acordo com o sistema de injeção utilizado: câmara quente ou fria. O presente trabalho se restringirá ao processo de câmara quente.

No processo de câmara quente são utilizados moldes permanentes, geralmente metálicas e construídas em duas partes, são hermeticamente fechadas no momento do vazamento do metal líquido, podendo ser usadas inúmeras vezes. A matriz pode ser utilizada fria ou aquecida à temperatura do metal líquido, o que exige materiais que suportem essas temperaturas.

O metal líquido contido em um recipiente, chamado de câmara de injeção, é forçado sob alta pressão a preencher rapidamente as cavidades e os canais localizados em determinados pontos para evasão do ar. Enquanto o metal solidifica, a pressão é mantida durante certo tempo, até que a solidificação se complete. Após o término da solidificação do metal, o molde se abre para a extração da peça. Procede-se, então, a limpeza da matriz e a sua lubrificação. Fecha-se novamente e o ciclo é repetido.

2.1.1 Principais Vantagens

O processo de FSP permite a alta capacidade de produção, formas mais complexas do que na fundição por gravidade, peças com paredes finas e tolerâncias dimensionais mais estreitas, com a possibilidade de utilização da mesma matriz para milhares de peças, sem variações significativas nas dimensões das peças produzidas.

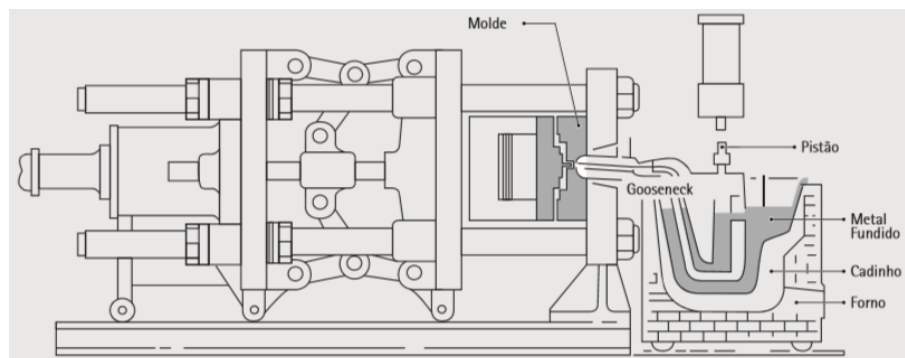
2.1.2 Principais Desvantagens

Por outro lado, no processo de FSP as dimensões das peças são limitadas, normalmente seu peso é inferior a 5 kg, podendo haver dificuldade de evasão do ar retido no interior da matriz dependendo dos contornos das cavidades e dos canais. Assim, o ar retido é a principal causa de porosidade nas peças fundidas. Os equipamentos e os acessórios são relativamente caros, de modo que o processo somente se torna econômico para grandes volumes de produção.

2.1.3 Injetoras de Câmara Quente

O forno, juntamente com a câmara de injeção, está acoplado à injetora (Figura 2), formando um só conjunto. No interior de um forno aquecido por resistências elétricas, estão submersos, no metal líquido, o pistão e a câmara de injeção (*Gooseneck*). Quando o pistão está retraído, o metal líquido entra na câmara de injeção, através de orifícios, preenchendo toda sua cavidade.

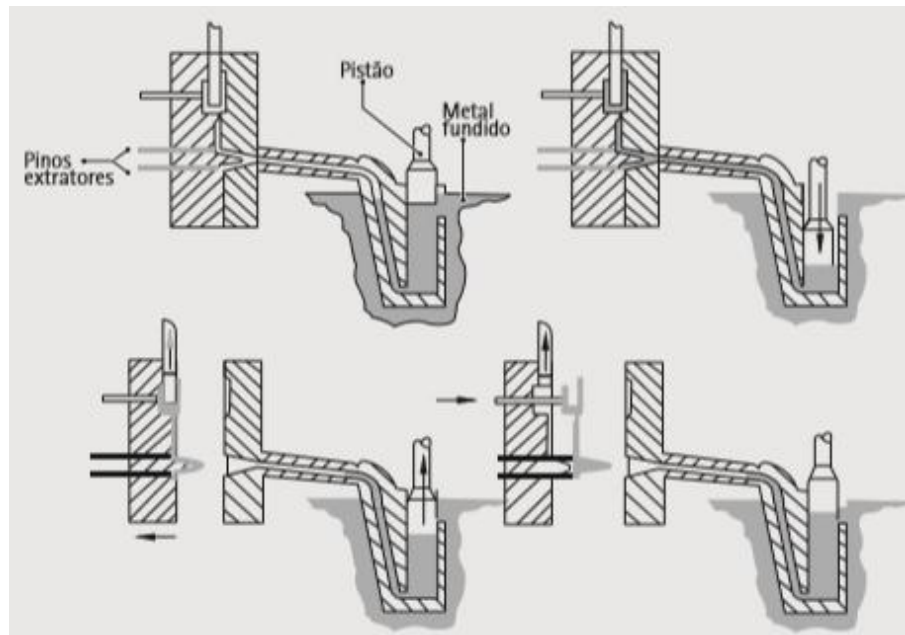
Figura 2 – Seção transversal de uma injetora de câmara quente.



Fonte: Malavazi (2010).

À medida que o pistão é acionado, estes orifícios são bloqueados confinando determinado volume de metal líquido que, por sua vez, é forçado a percorrer toda a extensão da câmara e preencher a cavidade do molde, como é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Sequência de fundição sob pressão em câmara quente.



Fonte: Malavazi (2010).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DA LIGA UTILIZADA NO FUNDIDO

Segundo Soares (2008), a liga de zamac foi descoberta no início na década de 30, com uma forte atuação na confecção de miniaturas de carros, possibilitando a fabricação de vários tipos de modelos de automóveis devido a sua facilidade de manuseio e a facilidade de confecção dos mesmos. Esta liga é utilizada para fabricar maçanetas, espelhos, cilindros, chaves e alguns componentes das fechaduras (cubo, trinco, lingueta, etc). Sua cor natural é cinza.

Zamac é uma liga metálica que apresenta em sua composição química zinco, magnésio, alumínio e cobre. Possibilita a obtenção de peças de formato complexo. Sua aplicação por processos de injeção à quente confere grande facilidade de produção de peças, além de oferecer pouco desgaste do molde de injeção.

Segundo Malavazi (2005), as peças típicas produzidas por esse processo apresentam as seguintes vantagens:

- Obtenção de peças complexas;
- Elevado volume de produção, com alta produtividade;
- Pouca ou nenhuma operação de usinagem;

- Produção de peças de paredes finas;
- Obtenção de peças com texturas;
- Reduz custos de usinagem e montagem (menor caminho entre metal e peça acabada);
- Longa vida útil ao molde;
- Pressão de injeção relativamente baixa.

2.2.1 Tipos de Ligas de ZAMAC

Segundo Malavazi (2010), existem vários tipos de ligas de zamac disponíveis para diversas aplicações. Os principais elementos que são adicionados ao zinco, para obtenção de ligas adequadas ao processo de fundição sob pressão, são o alumínio, o cobre e o magnésio. Os teores desses elementos afetam diretamente as propriedades mecânicas das peças obtidas. As ligas de zinco podem ser divididas em dois grupos de acordo com o conteúdo nominal de alumínio: as ligas zamac 2, 3, 5 e 7 contêm aproximadamente 4% de alumínio, e as ligas ZA (zinco alumínio) variam de 8% a 27% de alumínio.

As ligas mais comumente utilizadas para fundição sob pressão são o zamac 3 e o zamac 5. Normas internacionais especificam a composição química de ligas de zinco para fundição. Tabela 1 ilustra a composição conforme a *American Society for Testing and Materials* ASTM B240 - 13.

Tabela 1 – Composição química das ligas de zinco para fundição.

Elementos	Zamac 3		Zamac 5	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Al	3,9	4,3	3,9	4,3
Mg	0,03	0,06	0,03	0,06
Cu	-	0,1	0,7	1,1
Fe	-	0,035	-	0,035
Pb	-	0,004	-	0,004
Cd	-	0,003	-	0,003
Sn	-	0,0015	-	0,0015
Ni	-	-	-	-
Zn	Restante		Restante	

Fonte: Adaptado de ASTM B240 - 13.

São destacadas a seguir as principais ligas de zamac utilizadas no processo de fundição sob pressão:

- **Zamac 3**

Largamente usado nos Estados Unidos, apresenta combinação entre as propriedades de resistência, fundibilidade, tratamento superficial e pintura. O zamac 3 possui maior estabilidade dimensional quando comparado ao zamac 5, por isso, é recomendado para situações onde o requisito principal é a tolerância dimensional restrita, (MALAVAZI, 2010).

- **Zamac 5**

Similar ao zamac 3, a liga zamac 5 diferencia-se pela adição de cobre, que por sua vez, aumenta a resistência mecânica e dureza, porém, reduz o alongamento. A mais resistente à deformação por fluência da sua família. É recomendada para peças sujeitas à ação de desgaste, (MALAVAZI, 2010).

A Tabela 2 apresenta as principais propriedades das ligas de zinco:

Tabela 2 – Propriedades das principais ligas de zinco.

Propriedade	Ligas de Zinco		
	Unidades	Zamac 3	Zamac 5
Limite de escoamento	MPa	268	295
Dureza	Brinell	97	114
Massa específica	g/cm ³	6,6	6,7
Coefficiente de expansão térmica	μm m ⁻¹ °C ⁻¹	27,4	27,4
Condutividade térmica	Wm ⁻¹ °C ⁻¹	113	109
Intervalo de temperatura de fusão	°C	381-387	380-386
Calor específico	J/Kg.°C	419	419
Frequências típicas de produção	Injeções/hora	0,4	0,4
Ciclo de vida típico de ferramenta	Injeções	750.000 - 2.000.000	

Fonte: Adaptado de Malavazi (2010).

2.3 DEFEITOS DE INJEÇÃO

As peças fundidas em ligas de zinco geralmente recebem um revestimento para proteção ou decoração. Em casos onde os fins são decorativos, os defeitos se tornam fatores críticos. A investigação da origem dos defeitos se torna mais complexa quando a análise é feita no produto já acabado, tornando-se difícil identificar se o defeito teve origem no processo de fundição ou no processo de acabamento. A seguir os principais defeitos oriundos do processo de fundição sob pressão.

2.3.1 Porosidade Gasosa

Segundo Malavazi (2010), a porosidade gasosa é um problema relacionado com métodos de injeção de alta velocidade, grande turbulência do escoamento, e rápida taxa de preenchimento necessária ao processo. O ideal seria que o processo de injeção fosse realizado de forma a minimizar a turbulência no escoamento de metal durante o preenchimento do molde e, portanto, reduzir a quantidade de gases aprisionados.

Este tipo de defeito quase sempre aparece na forma de bolhas aprisionadas que se assemelham a uma série de buracos no interior da peça. Muitas peças podem não aparentar, mas mesmo assim contêm uma quantidade substancial de gases aprisionados que, quando aquecidos no processo de banho galvânico, irão se expandir e causar falhas no revestimento.

A principal fonte da porosidade gasosa é ar aprisionado. Portanto, é possível reduzir esta quantidade garantindo que as saídas de gases do molde estejam bem projetadas e funcionando adequadamente, ou seja, devem ser posicionadas nas últimas áreas do molde a serem preenchidas. Segundo Walkington (2006), a área de ataque e o projeto dos canais de alimentação também influenciam na quantidade de ar aprisionado, que é o foco deste trabalho.

2.3.2 Bolhas

Segundo Malavazi (2010), bolhas também são provenientes do aprisionamento de gases no interior da peça. A diferença é que por estarem mais próximas à superfície da peça, se tornam mais visíveis.

O gás fica sob pressão durante o processo de solidificação. Quando a peça é removida do molde e sua superfície ainda está quente o metal fundido é maleável, permitindo que a pressão do gás aprisionado deforme a superfície, formando bolhas.

2.3.3 Junta fria

Segundo Malavazi (2010), as juntas frias são defeitos superficiais nos quais a peça fica com uma aparência desuniforme. O defeito é menos perceptível se a peça receber acabamento como jateamento com granalha ou vibratório, pois a ação mecânica sofrida pela peça irá remover a camada superficial.

Esse defeito tem origem durante o preenchimento da cavidade e a solidificação do metal e geralmente está associado à injeção antecipada de metal na região da cavidade que apresentou o defeito, antes de desenvolver-se o escoamento do metal alimentado. Esse metal injetado antecipadamente acaba por se solidificar na superfície mais fria do molde. Se o metal restante entrar em contato e não houver refusão do metal que já estava solidificado, ocorrerá a junta fria.

Portanto, defeitos de junta fria estão associados a deficiências no sistema de alimentação e no projeto do molde. Baixas temperaturas do molde e do metal fundido também acentuarão o problema.

2.4 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), fluidodinâmica computacional (CFD) é o termo que engloba as técnicas matemáticas, numéricas e computacionais utilizadas para simular o escoamento de fluidos. Esta metodologia consiste na construção de modelos numéricos que aproximam modelos matemáticos para escoamentos físicos.

Esta é uma ferramenta útil para auxiliar no entendimento do escoamento, transferência de calor e massa e reações químicas através de milhares de cálculos que são executados para simular a interação das fases de um determinado volume de controle. CFD utiliza equações de conservação de grandezas físicas, as quais possuem origem na teoria de fenômenos de transporte.

É importante levar em consideração que simulações CFD, com as adequadas condições de contorno, procuram aproximar os comportamentos reais, ou seja, os dados de

entrada dos programas e as equações utilizadas por ele devem atender à maior parte das variáveis envolvidas. Na maioria das áreas, ainda é necessário o desenvolvimento de modelos mais precisos para descrever em detalhe a geometria do domínio de cálculo.

A CFD é uma técnica útil para auxiliar na busca de soluções para problemas reais, desde que conheçam suas capacidades e suas limitações. Para o presente trabalho foi utilizado o software de simulação computacional Magma Soft® versão 5.2, desenvolvido pela empresa alemã MAGMA GmbH. A escolha deste software deve-se, principalmente, pela interface voltada para o processo de injeção sob pressão, executada pelo módulo MAGMAhpdc (*high pressure die casting*) e pela tradição do uso por diversas empresas relacionadas à fundição. A pesquisa de trabalhos acadêmicos relacionados à otimização de moldes de injeção também influenciou na escolha do mesmo. O Magma Soft® utiliza o método de volumes finitos.

2.5 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

Método dos volumes finitos (MVF) é a técnica na qual podemos discretizar a lei geral da conservação das grandezas físicas diretamente no domínio de um problema, ou seja, considera os princípios físicos da conservação de certa grandeza através de volumes finitos, conseguindo resolver problemas complexos. Em um sistema conservativo, é possível aplicar o método, onde o domínio do problema é dividido em células e aplicado a lei da conservação para cada uma, assim, o equilíbrio total de todo o problema será atendido.

Segundo Marques (2005), o método dos volumes finitos foi primeiro apresentado por Maccormack e Paullay (1972), utilizado para solução das equações de Euler transientes em problemas 2D, e estendido para 3D por Rizzi e Inouye (1973 apud Nascimento, 2004). Apesar da existência de métodos como diferenças finitas e elementos finitos, cada método especializou-se em resolver problemas com características particulares: o método das diferenças finitas trata as não linearidades, como aquelas presentes nas equações de Navier-Stokes, porém não trabalhava com geometrias irregulares. Por outro lado, o método dos elementos finitos especializou-se em problemas onde as não linearidades eram secundárias, mas desenvolveu-se bem em geometrias irregulares. O MVF surgiu na década de 70 como uma ferramenta para solucionar problemas onde termos não lineares, como as acelerações convectivas presentes nas equações de Navier-Stokes estão presentes, mas inicialmente em coordenadas ortogonais e cartesianas.

Este método é aplicado na simulação de mecânica dos fluidos computacional por ser aplicado em malhas não estruturadas. O MVF é baseado no Teorema da Divergência

(Equação 1), no qual integrais de volume numa equação diferencial parcial que contenham termos divergentes são convertidas em integrais de superfície e assim avaliados como fluxos na superfície de cada volume, ou seja, permite transformar integrais de contorno em integrais de domínio.

$$\int \vec{v} \cdot \vec{n} dS = \int \vec{\nabla} \cdot \vec{v} dV \quad (1)$$

A base do MVF é a integração da equação da lei geral de conservação, ou seja, de uma determinada grandeza física, que é expressa pelas equações governantes sobre qualquer volume finito do domínio. Este é discretizado através de inúmeros volumes de controle que não se sobrepõem, chamada de malha na qual serão executadas as equações algébricas.

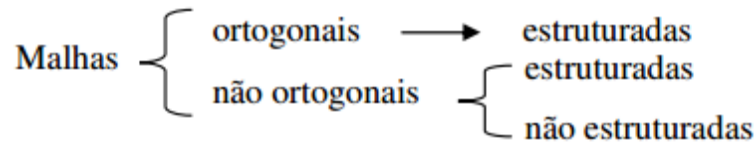
2.5.1 Malhas Numéricas

De acordo com Oliveira (2007), uma medida subjetiva é a aparência da malha, a sua capacidade de representar visualmente a geometria da peça. Uma malha com boa aparência não necessariamente é a melhor malha, mas uma malha de má aparência indica um sinal de problema. Uma malha de boa aparência possui elementos regulares, com boa forma e as transições de secções devem ser suaves e graduais sem elementos distorcidos. O Apêndice 1 mostra uma comparação de uma malha com boa aparência com transições suaves, e uma com transições bruscas.

Segundo Marques (2005), há diversas formas de discretizar um domínio físico. Deve-se observar, entretanto, que a escolha da malha influenciará na qualidade do resultado. A malha escolhida deve ser capaz de representar adequadamente as características gerais do problema, bem como se adequar aos contornos ou até mesmo ser refinada localmente para que as particularidades de cada fenômeno estudado possam ser representadas satisfatoriamente.

A malha utilizada na resolução do problema deve ser adequada à geometria de análise, deve envolver todo o domínio e atender aos requisitos gerais do problema. Assim como os métodos, cada malha tem suas vantagens e desvantagens e podem ser divididas conforme a Figura 4.

Figura 4 – Tipos de malhas.



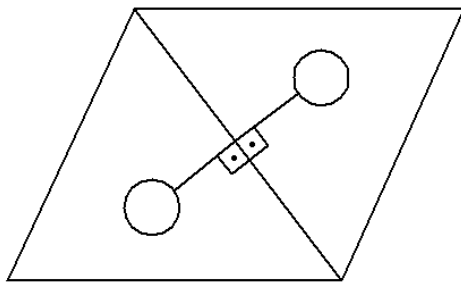
Fonte: Marques (2005).

Malhas ortogonais são assim chamadas as quais possuem os centros dos volumes de controle perpendiculares às faces dos contornos (Figura 5). Pode ser utilizada em qualquer tipo de domínio, porém em casos com geometrias mais complexas pode não se adaptar nos fechamentos dos contornos.

Malhas não ortogonais possuem adaptabilidade aos contornos de problemas complexos, os centros dos volumes de controles não têm restrição quanto ao paralelismo, atendendo aos requisitos da maioria das geometrias e levando em consideração as condições de contorno que possuem grande influência na resolução dos problemas.

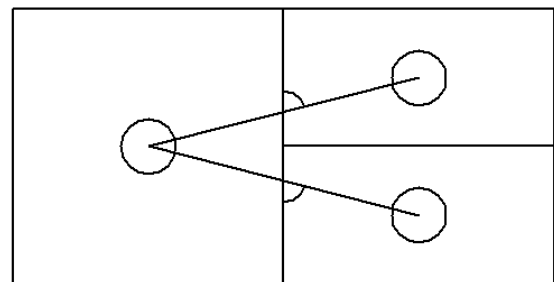
Malhas estruturadas e não estruturadas diferenciam-se pelo fato de as estruturadas possuírem uma lei de formação entre os volumes e os nós do domínio, tornando uma malha mais simples, porém com dificuldade de se adaptar e representar regiões onde a geometria é complexa. As não estruturadas não possuem ordem pré-definida entre os volumes do espaço discretizado, ou seja, o número de vizinhos pode variar de volume para volume (Figura 6).

Figura 5 – Malha ortogonal.



Fonte: Marques (2005).

Figura 6 – Malha não ortogonal.



Fonte: Autor (2014).

2.5.2 Equações Governantes

Para poder compreender o funcionamento de um software de simulação através de volumes finitos, devemos conhecer as equações que regem o seu funcionamento, revisando os

Essas equações podem ser encontradas em diversos textos clássicos de mecânica dos fluidos e transferência de calor computacional, como os de Patankar (1980) e Versteeg e Malalasekera (2007), de onde podem ser obtidas informações mais detalhadas sobre sua derivação, uma vez que aqui são apresentadas apenas na sua forma final.

2.5.3 Conservação de massa total

A conservação de massa, também conhecida como equação da continuidade, é expressa pela Equação 3.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

onde u , v e w representam as velocidades do escoamento nas direções x , y e z , respectivamente.

2.5.4 Conservação de quantidade de movimento

As equações de conservação de quantidade de movimento, também conhecidas por equações de Navier-Stokes ou de transporte de *momentum*, são dada pelas Equações 4, 5 e 6.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x + F_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y + F_y \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z + F_z \quad (6)$$

em que P é a pressão exercida no volume de controle, ρg representa as forças gravitacionais e F é qualquer outra força de campo externa.

2.5.5 Conservação de energia

A equação de conservação de energia pode ser escrita de múltiplas formas, em termos da energia total, da energia interna, da temperatura ou da entalpia. A Equação 7 é apresentada desta forma, em termos da entalpia total, H .

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u H)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v H)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w H)}{\partial z} \\ = - \left[\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial(uP)}{\partial x} + \frac{\partial(vP)}{\partial y} + \frac{\partial(wP)}{\partial z} \right] + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q}''' \end{aligned} \quad (7)$$

onde T é a temperatura, λ é a difusividade térmica e \dot{q}''' é um termo fonte por unidade de volume, devido, por exemplo, o sistema de refrigeração presente no molde de injeção.

A entalpia total (Equação 8), por sua vez, é obtida como a soma da entalpia sensível, h , e a variação de calor latente, ΔH .

$$H = h + \Delta H \quad (8)$$

na qual a entalpia sensível (Equação 9) é determinada através de:

$$h = h_f^{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p(T) dT \quad (9)$$

onde h_f^{ref} é a entalpia padrão de formação, c_p é o calor específico a pressão constante e T_{ref} é temperatura de referência.

2.5.6 Solidificação

A solidificação do metal no interior do molde de injeção, por sua vez, é a parte da modelagem matemática do problema que vai além da abordagem comum empregada na mecânica dos fluidos e transferência de calor tradicional.

Segundo Marques (2008), a solidificação do metal no interior da cavidade de moldação é um fenômeno não linear, transitório, que implica a transferência de calor latente numa interface líquido-sólido que avança à medida que a solidificação progride. A

solidificação tem início junto às paredes do molde, onde a transferência de calor é mais relevante, e progride para o centro. Assim, seções de menor espessura solidificam primeiro. A mudança para a fase sólida é acompanhada de contração que pode originar cavidades e poros se não for devidamente compensada.

Esta análise implica no conhecimento das propriedades do metal fundido e do material utilizado na confecção do molde permanente. Estas propriedades variam durante o preenchimento e solidificação do fundido, assim como os parâmetros de refrigeração e temperatura ambiente. E com o preenchimento do molde, a solidificação deve ser analisada através da simulação, aplicando o balanço de energia na interface líquido-sólido. Dessa forma, além do desafio da modelagem matemática da solidificação do fluido, ao mesmo tempo ainda estão associados os fenômenos advectivos da fase líquida, ou seja, de transporte de quantidade de movimento do fluido, que pode ter grande influência no processo de mudança de fase, conforme descrito por Henry e Argyropoulos (1996).

Ao invés de determinar explicitamente a localização da interface líquido-sólido, Voller e Prakash (1987), propõe uma técnica baseada na entalpia e em uma pseudoporosidade do material. Nessa técnica, uma quantidade denominada fração líquida, que indica a fração líquida no volume de controle, é associada a cada célula no domínio. A fração líquida, β , que varia de 0 (para a fase sólida) e 1 (para a fase líquida), pode ser definida pela Equação 10.

$$\begin{aligned} \beta &= 0 & \text{se } T &\leq T_{solidus} \\ \beta &= 1 & \text{se } T &\geq T_{liquidus} \\ \beta &= \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & \text{se } T_{solidus} &< T < T_{liquidus} \end{aligned} \quad (10)$$

onde $T_{solidus}$ é a temperatura máxima na qual o material está completamente na fase sólida e $T_{liquidus}$, de forma análoga, é a temperatura mínima na qual o material está completamente na fase líquida. $T_{solidus}$ e $T_{liquidus}$ são iguais somente para substâncias puras.

A fração líquida, assim, é calculada em cada iteração resolvendo simultaneamente a Equação (9), para o balanço de energia, e a Equação (10). Dessa forma, esta técnica considera que a região do domínio na qual o valor para a fração líquida está entre 0 e 1 é uma zona "pastosa", pseudoporosa. Portanto, a fração líquida no volume de controle diminui à medida que diminui a temperatura do material, até que se torne nula quando totalmente solidificado, e, conseqüentemente, fazendo com que o escoamento seja cessado, ou seja, zerando seu vetor velocidade.

Há, porém, diversas formas de modelar o problema de mudança de fase em uma simulação CFD. Relevantes revisões acerca das principais abordagens podem ser encontradas em Voller (1996) e em Henry e Argyropoulos (1996).

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1 INTRODUÇÃO

Considerando os objetivos específicos descritos no tópico 1.3 deste relatório, neste capítulo será apresentado o desenvolvimento das atividades propostas.

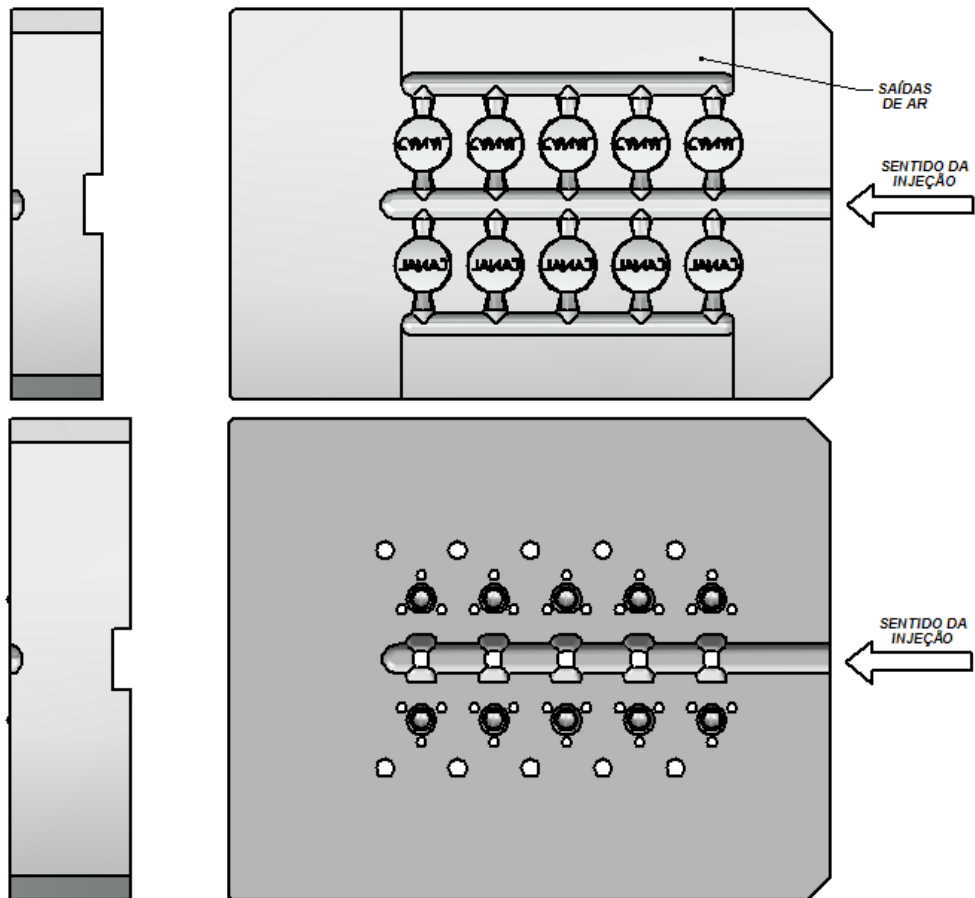
A proposta deste trabalho foi desenvolver uma melhoria no atual sistema de canais, procurando reduzir o problema de refugo de peças, padronizando uma metodologia para cálculo de canais de injeção através do processo de FSP para o tipo de peça escolhida, o que atualmente é empírico, projetado de uma forma quase que indiscriminada, sem justificar a sua escolha. Para o desenvolvimento da proposta, o projeto dos canais levou em conta os dados de máquina, o escalonamento ao longo da matriz através do dimensionamento dos canais, organização dos parâmetros de processo e princípios de escoamento.

3.2 ANÁLISE DO MODELO ATUAL

O atual modelo de canais utilizados na confecção do molde é o apresentado na Figura 8, o qual será denominado como “modelo 1”. A imagem superior é a placa das cavidades, que leva o formato do produto e a marca do cliente e a imagem inferior é a placa da ferramenta. A marca utilizada é a N° 0181419 (“CANAL”), do item RB4.095.01.Z, o qual foi escolhido para teste por ser um caso típico de refugo por problemas de injeção. Uma região da cavidade possui a arte e o restante possui uma área lisa, onde os defeitos presentes nas peças ficam evidentes justamente nestas áreas (Figura 9).

Este canal padrão possui uma seção contínua desde o início da lateral direita, onde é posicionado o bico de injeção da máquina, até próximo à extremidade esquerda do molde. Bolsas de ar, também conhecidas como “*overflows*”, estão localizadas no sentido oposto aos canais de ataques, os “*gates*”, e unidas entre si. As saídas de ar do molde estão posicionadas atrás das bolsas.

Figura 8 – Modelo 1.



Fonte: Autor (2014).

Figura 9 – Defeito em rebites.



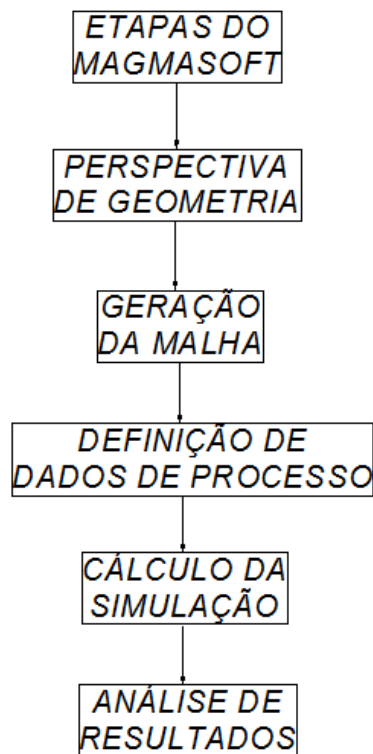
Fonte: Mundial S/A (2014).

3.2.1 Materiais e métodos

Nesta etapa serão apresentados os métodos de pré-processamento para a análise da proposta apresentada neste trabalho.

A modelagem dos canais foi executada no *software* de CAD *Solid Edge*. Essa modelagem tem como objetivo a obtenção dos modelos para extração e exportação para o *software* de simulação *Magmasoft*®, o qual possui cinco distintas etapas, como apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma método de análise pelo Magmasoft.



Fonte: Autor (2014).

Perspectiva de geometria

Inicialmente o sistema de canais já modelado foi introduzido no *Magmasoft* através da geração de arquivos com extensão STL (arquivo de estereolitografia) pelo *Solid Edge*. Nesta etapa é necessário definir cada peça do molde, ou seja, cada elemento do molde será dividido em ID's (identidade para cada arquivo) para que o software identifique a função que

cada geometria (Apêndice 3). Esta divisão define também os grupos que serão considerados primeiro, determinando de forma mais precisa a seção de área dos ataques. Estes arquivos são divididos entre:

- *Cover die*: lado fixo do molde, onde estão a placa das cavidades e o cabeçote da máquina com refrigeração, juntamente com as representações das saídas de ar (Apêndice 4);
- *Ejector die*: lado móvel do molde, constituído de placa fixa, refrigeração, adaptador e extratores da peça e canal (Apêndice 5);
- *Runner*: canal de injeção;
- *Gate*: canal de ataque;
- *Overflows*: bolsas;
- *Casting*: peças;

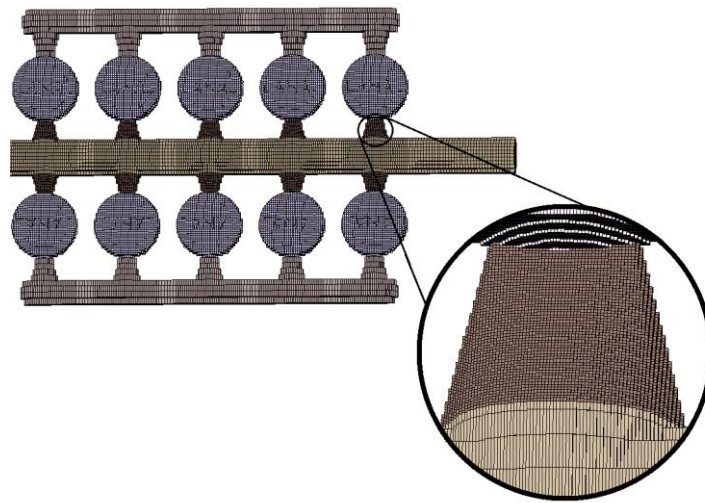
Vents: Saídas de ar descritas como cilindros, elas representam a secção de área disponível para ventilação do molde, diminuindo o aprisionamento de ar das cavidades, são consideradas condições de contorno e não volumes. Para esta definição é necessário aplicar um diâmetro hidráulico e um comprimento que irão influenciar na resistência do fluxo.

$$D_H = \frac{4.A}{P} = \frac{4.(12*0,02)}{2(12+0,02)} \simeq 0,04 \text{ mm}^2 \quad (11)$$

Geração da malha

Como dito anteriormente, o cálculo da simulação é realizado a partir das inúmeras células em que é dividido o problema. O refinamento da malha é proporcional às dimensões dos modelos, pois representa a quantidade de dados em cada volume finito. Neste caso foi aplicado um refinamento manual para se adaptar e representar as regiões mais complexas (Figura 11). As medidas de cada volume de controle estão conforme o Apêndice 6, o qual apresenta 151 mil volumes de controle para as cavidades e canais e 2,6 milhões para o conjunto total do molde.

Figura 11 – Malha.



Fonte: Autor (2014).

Perspectiva de definição dos parâmetros de processo

Nesta etapa de pré-processamento é realizada a definição dos dados de processo:

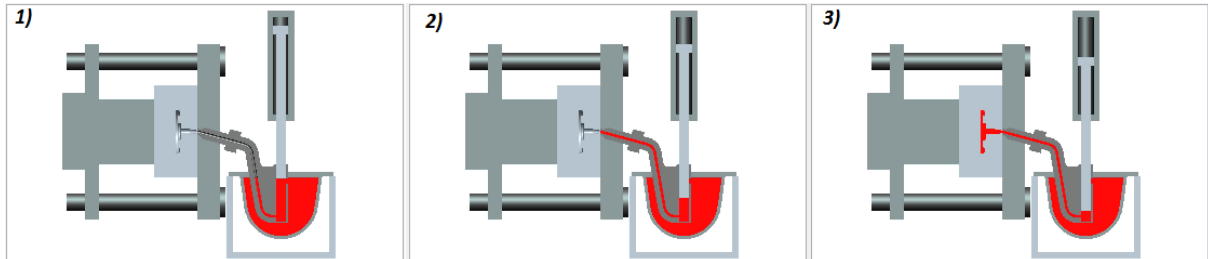
- Definição de materiais: onde são designados materiais específicos para cada geometria, selecionados a partir do banco de dados do software;
- Temperaturas iniciais: As temperaturas definidas geralmente são as após os ciclos de aquecimento do molde (10 ciclos), ou seja, a simulação ocorrerá à temperatura média de operação do molde;
- Parâmetros de ciclo: Definidos como uma linha do tempo do processo, onde são inseridos tempos de preparação do molde, aplicação do desmoldante, fechamento, enchimento da matriz, intensificação, resfriamento, abertura do molde e ejeção da peça, conforme mostra o Apêndice 7;
- Parâmetros de injeção: Através de dados de injeção do manual da máquina e desenho do sistema de injeção (Apêndice 8) foi elaborada a tabela do Apêndice 9:

Ainda na interface de injeção são definidas as etapas do curso da máquina, conforme a Figura 12:

- 1) Estado inicial, onde a câmara de injeção está cheia de metal líquido;
- 2) Posição do pistão, quando o orifício de alimentação no banho é coberto e o *goosneck* está preenchido;

3) Injeção a alta velocidade para dentro das cavidades.

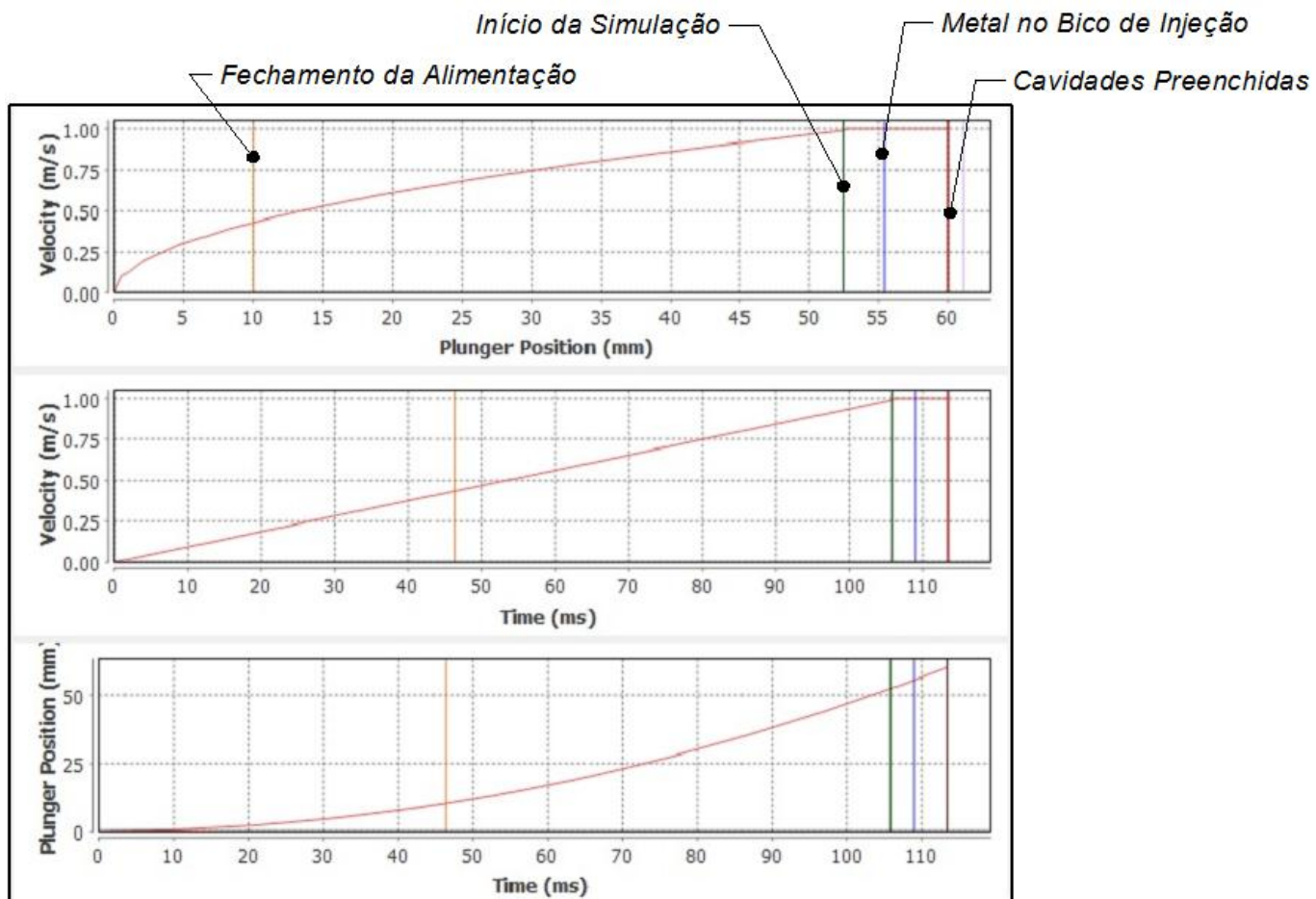
Figura 12 – Etapas do preenchimento do molde.



Fonte: Autor (2014).

Com as definições anteriores o *software* gera gráficos de velocidade, tempo e posição do pistão de injeção (Figura 13):

Figura 13 – Gráficos gerados pelo software.



Fonte: Autor (2014).

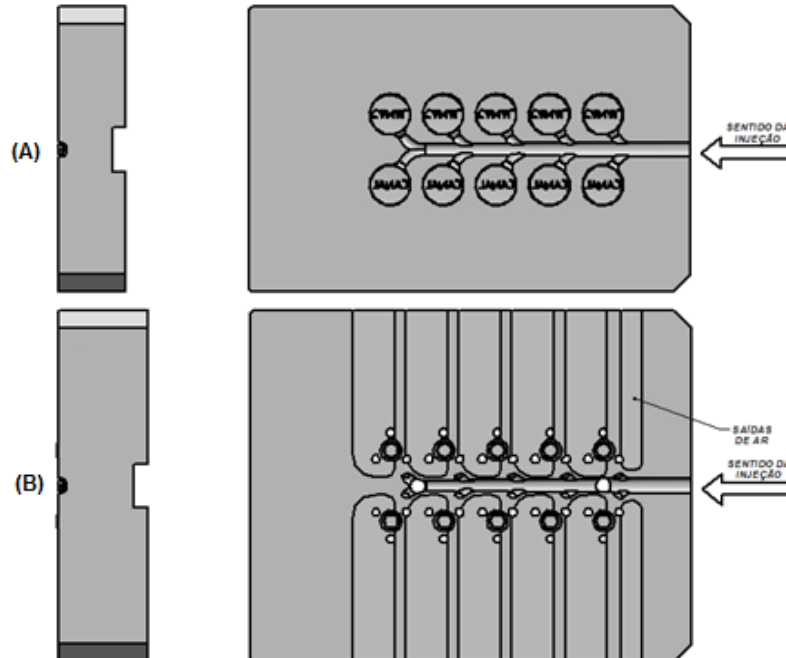
Cálculo da Simulação

É na perspectiva de simulação que o cálculo do processo de fundição realmente ocorre. O passo para cada iteração possui tempo de 0,025 segundos com tempo de simulação de 6 horas e 36 minutos para o modelo 1, utilizando 1 núcleo de processamento, sistema Intel® Xeon® CPU E5-1620 0 @ 3.60 GHz, memória RAM 28 GB.

3.3 PROPOSTA E RESULTADOS

Como descrito anteriormente, a proposta deste trabalho foi sugerir uma alteração no modelo de canais de injeção proporcionando um entendimento do escoamento de material no interior do molde. Através da simulação, e aliada a referências de autores na área da injeção e desenvolvimento de moldes, foram alterados parâmetros de construção dos canais de injeção e verificados os resultados. O modelo 2 ficou conforme a Figura 14.

Figura 14 – Modelo 2, vista A (placa móvel) e vista B (placa fixa).

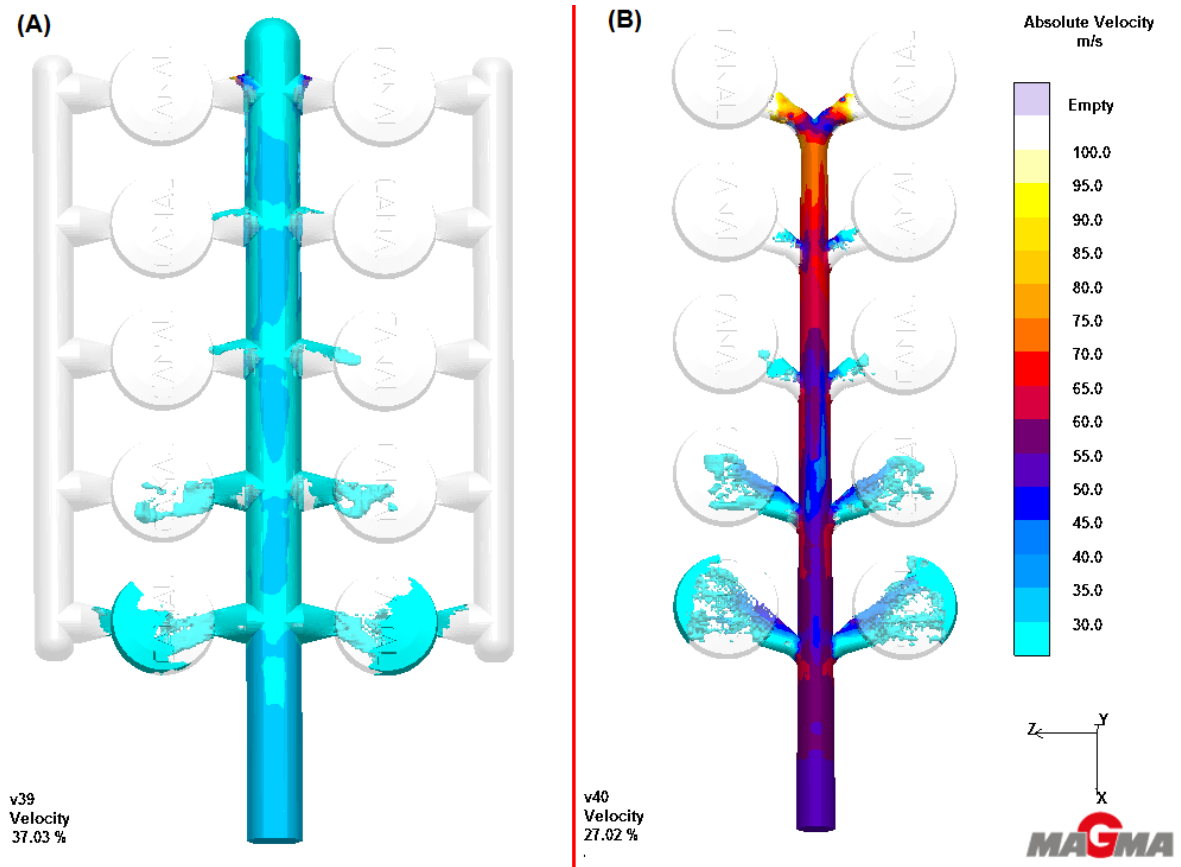


Fonte: Autor (2014).

Para o modelo 2 foram feitas diversas comparações e interações, iniciando-se pelo escalonamento do canal principal. Segundo Schmidt (2013), a seção deve reduzir de forma homogênea até o ataque, pois reduz o risco de aprisionamento de ar e o metal deve acelerar

continuamente em direção ao ataque. Na Figura 15 é possível ver a diferença entre o modelo 1 (A), que possui uma velocidade constante próximo a 30 m/s e o modelo 2 (B), onde a velocidade varia de aproximadamente 45 m/s até >100 m/s próximo aos canais de ataque.

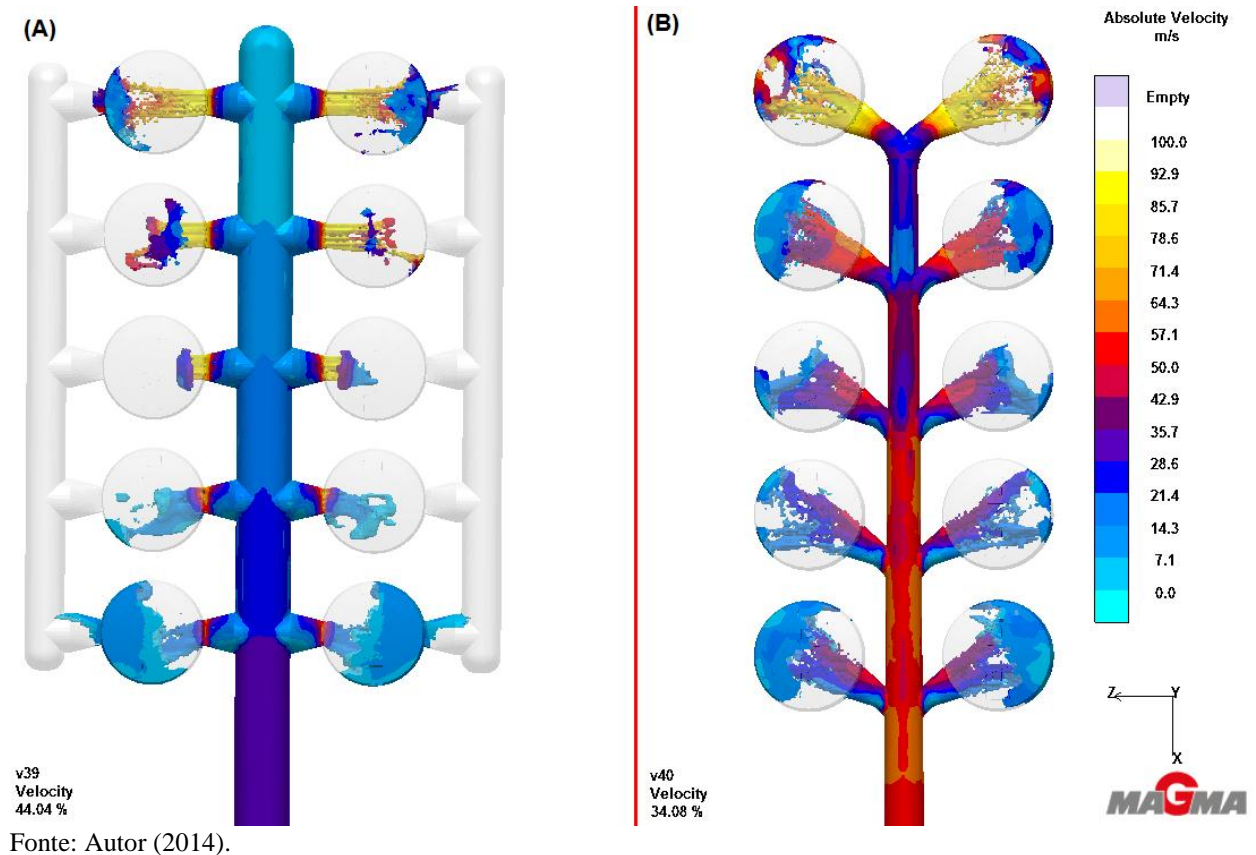
Figura 15 –Velocidade, escala de 30 a 100 m/s, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).



Fonte: Autor (2014).

Segundo Menges e Mohren (1993), o canal de alimentação deve garantir que o material chegue a todos os pontos de injeção ao mesmo tempo e com a mesma pressão e temperatura. Esta diferença de preenchimento, ilustrada na Figura 16 (A), entre as cavidades próximas ao bico de injeção e as na parte central do molde promove qualidade desigual nas peças injetadas no mesmo ciclo e mesmos parâmetros. No modelo 2 (B), o preenchimento se mostra uniforme ao longo do molde, com uma pequena variação entre as cavidades.

Figura 16 – Velocidade, escala de 0 a 100 m/s, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).



A distribuição entre as cavidades no modelo 1 possui uma curva de 90° , a qual promove o descolamento nos vetores do escoamento na parede do canal, criando um vácuo diretamente atrás da seção de curva que “puxa” o ar para dentro da cavidade, gerando perda de velocidade como ilustrado na Figura 17. Este cotovelo foi substituído por uma entrada com raio seguida de um ângulo com a finalidade de reduzir a turbulência e o escoamento de material no sentido oposto (Figura 17 e 18, A). De acordo com Schmidt (2013), esta mudança na direção deve ser acompanhada de uma redução da seção do canal de ataque de 10 a 30%, pois desta forma são evitados problemas de aspiração de ar e cavitação na parede interna do canal e obtém-se um ganho na velocidade do escoamento. A Figura 18 mostra a comparação dos caminhos do escoamento através de vetores com o preenchimento de aproximadamente 50% das cavidades onde nota-se a recirculação de material de acordo com a orientação das setas.

Figura 17 – Linhas de corrente, canal principal, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).

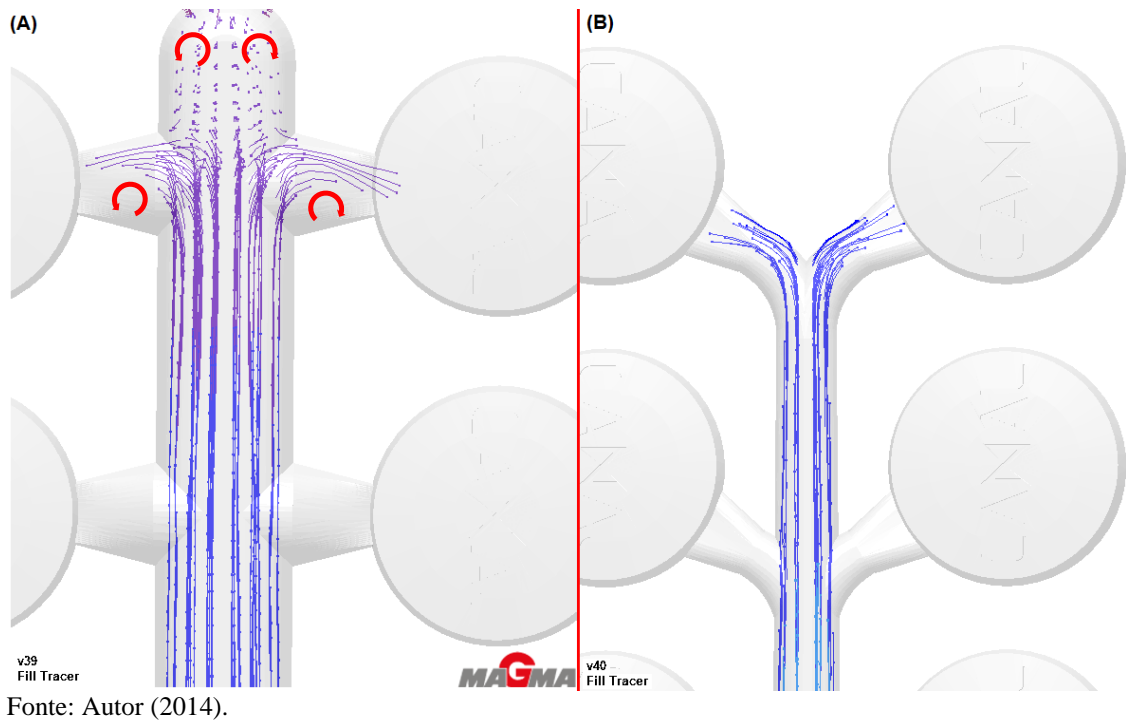
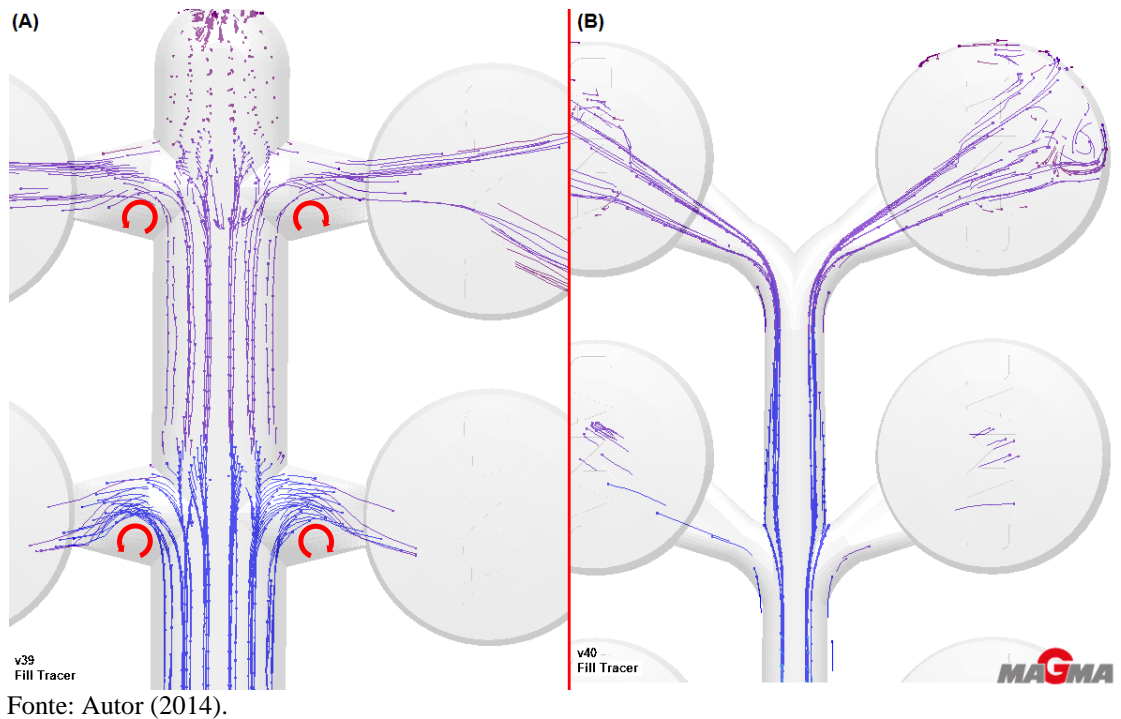


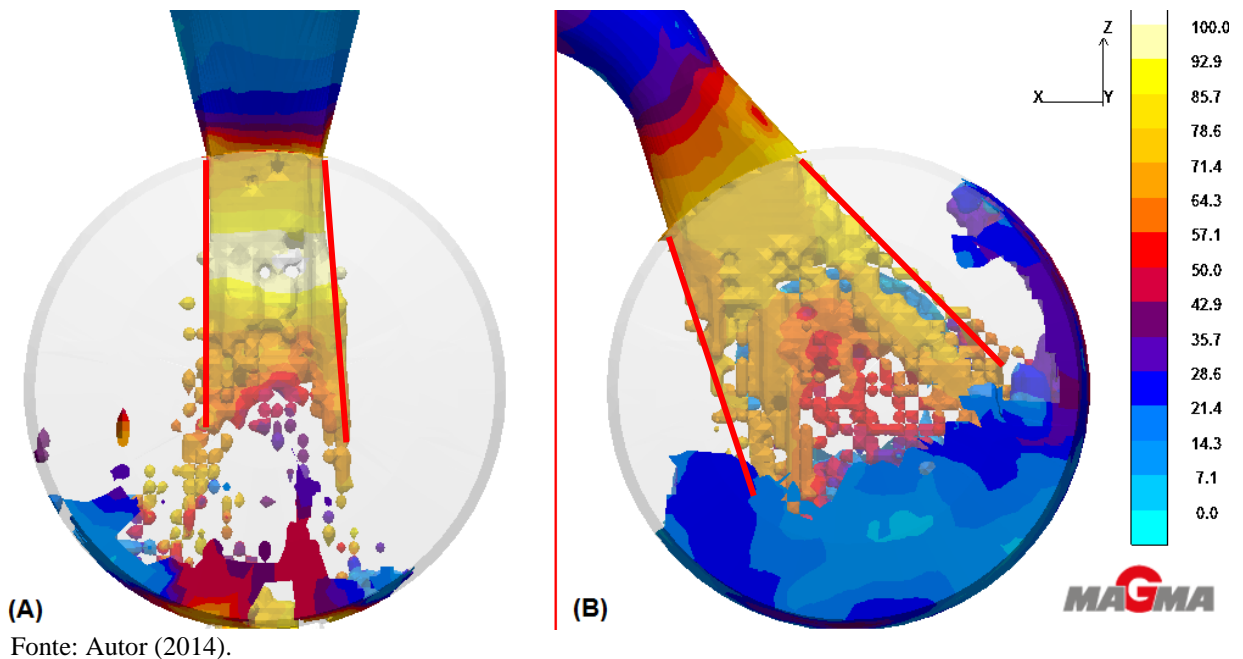
Figura 18 – Linhas de corrente, canais de ataque, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).



O *gate* ou canal de ataque pode ter diversos formatos e dimensões, os quais devem atender às necessidades de tempo de preenchimento, velocidade e fluxo de massa para dentro da cavidade em função do tempo de solidificação, pois possui a menor área de todo o sistema

de alimentação e conseqüentemente solidifica primeiro, além de ser projetado de forma que não comprometa o processo de rebarbamento ou tamboreamento posterior. Neste estudo o *gate* modelo “cunha” era utilizado no modelo 1 (Figura 19, A), o qual concentra o escoamento na região central da peça e atinge velocidades superiores a 100 m/s, que de acordo com Schmidt (2013), provocam erosões no molde, levando ao desgaste prematuro desta região do molde e maior aprisionamento de ar.

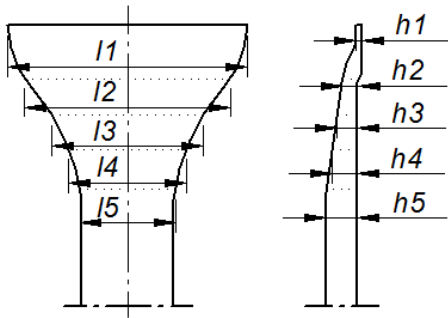
Figura 19 – Velocidade em escala de 0 a 100 m/s, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).



No *gate* do modelo 2 foi utilizado o modelo “*fan*” ou “leque”, pois promove a varredura da cavidade com o preenchimento abrangendo maior área da peça (Figura 19, B), criando uma frente de escoamento uniforme. Uma característica deste modelo é o rápido enchimento da cavidade, bem como o resfriamento, permitindo ciclos curtos. Para evitar o aprisionamento de ar e elevadas perdas de pressão no canal de ataque, a área da secção diminui continuamente no sentido da peça (Figura 20).

O dimensionamento do *gate* ficou conforme as medidas da Figura 22. A área do fluxo de massa passou de 0,50 mm² para 1,05 mm². As medidas foram definidas conforme testes práticos, onde a geometria da peça possui diâmetro de 9,5 mm e a largura do *gate* ficou 1/3 do diâmetro da peça e 0,40 mm de altura. Acima destas medidas o desganhamento é prejudicado, dificultando a retirada de rebarbas da peça, como mostra a Figura 21.

Figura 20 – Redução da área de ataque.

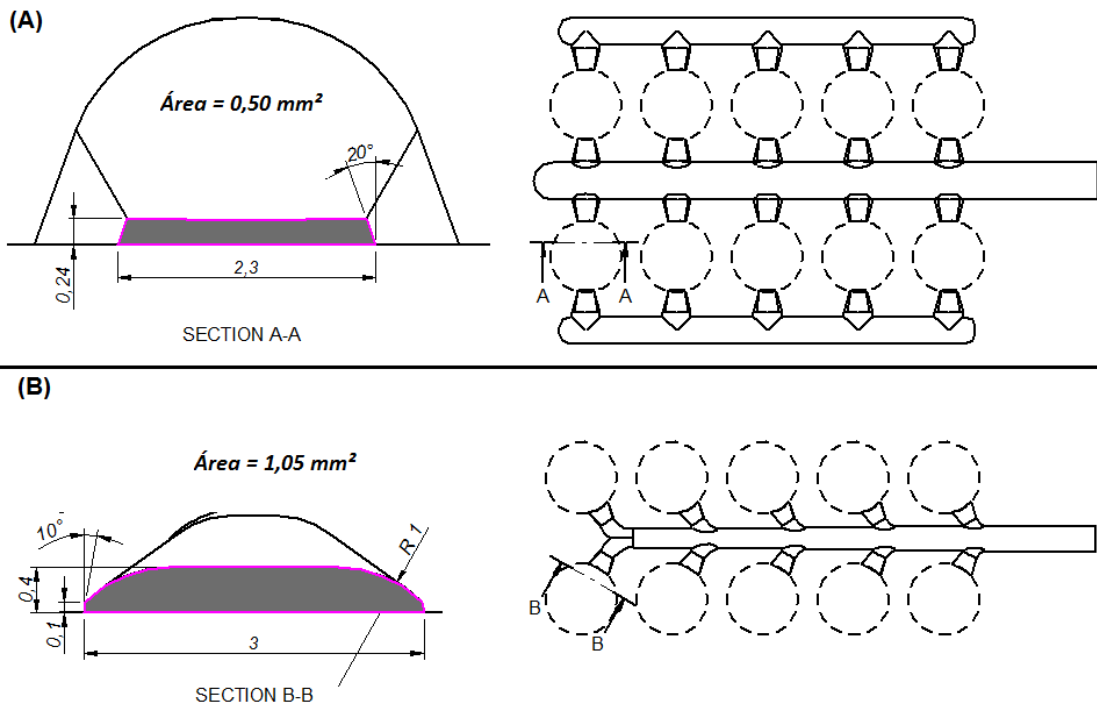


Fonte: Autor (2014).

Figura 21 – Rebarbas de *gate*.

Fonte: Mundial S/A (2014).

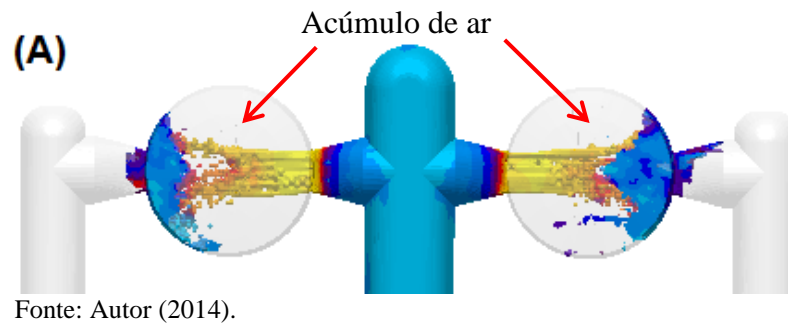
Figura 22 – Áreas de ataque, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).



Fonte: Autor (2014).

As bolsas são ligadas às peças por um canal fino, as quais servem para acumular de uma forma rápida o ar que vai ser expulso da cavidade do molde durante o seu enchimento. Na Figura 23 é possível perceber que o escoamento de metal no modelo 1 é direcionado de maneira que a bolsa comece a ser preenchida antes que a cavidade esteja completamente cheia, restringindo a saída e acumulando ar dentro da própria peça, ou seja, além de não permitir a retirada dos gases ainda “rouba material” da peça, fugindo da sua função principal que é ser a última zona a ser preenchida, retirando os gases do sistema.

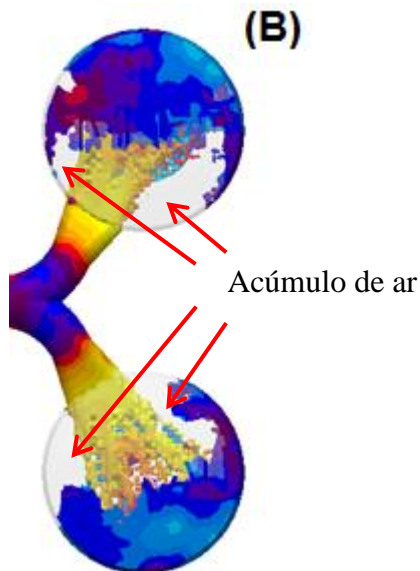
Figura 23 – Preenchimento da peça, modelo 1 (A).



Fonte: Autor (2014).

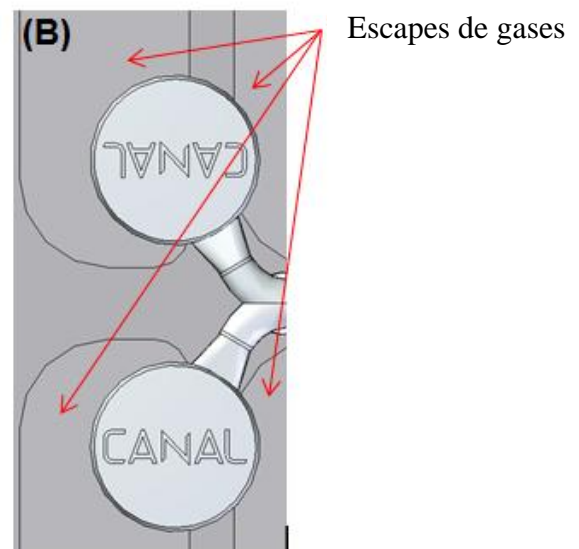
Para o modelo proposto, foram removidas completamente as bolsas. Por ser uma peça circular, estas teriam que ser posicionadas no mesmo sentido e ao lado do canal de ataque. Porém, pelo volume da peça ser pequeno, não se faz necessária sua inclusão neste tipo de peça. Somente os escapes de ar foram mantidos, reposicionados para a região que é preenchida por último (Figuras 24 e 25) e redimensionados para garantir a sua eficiência de modo com que não produza rebarbas nas peças, passando sua espessura de 0,02 mm para 0,05 mm (Apêndices 10 e 13).

Figura 24 – Preenchimento, modelo 2 (B).



Fonte: Autor (2014).

Figura 25 – Escape de gases, modelo 2 (B).



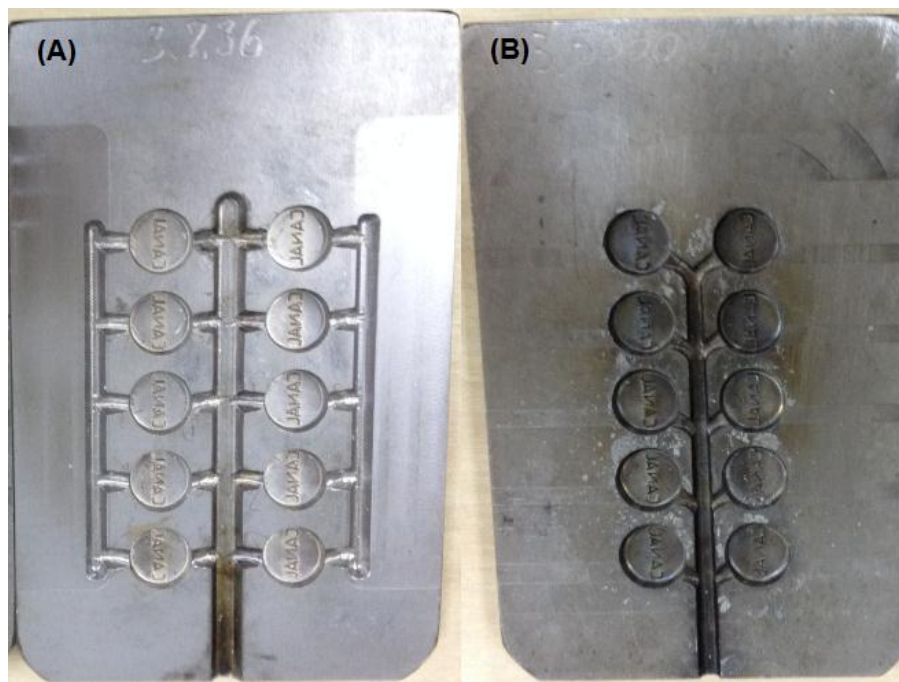
Fonte: Autor (2014).

3.3.1 Investigação Experimental

Para validar as conclusões obtidas no modelo numérico foram confeccionados os moldes em aço H13 (Figura 26) e injetados na máquina *Technire 24NTX* (Figura 27) no

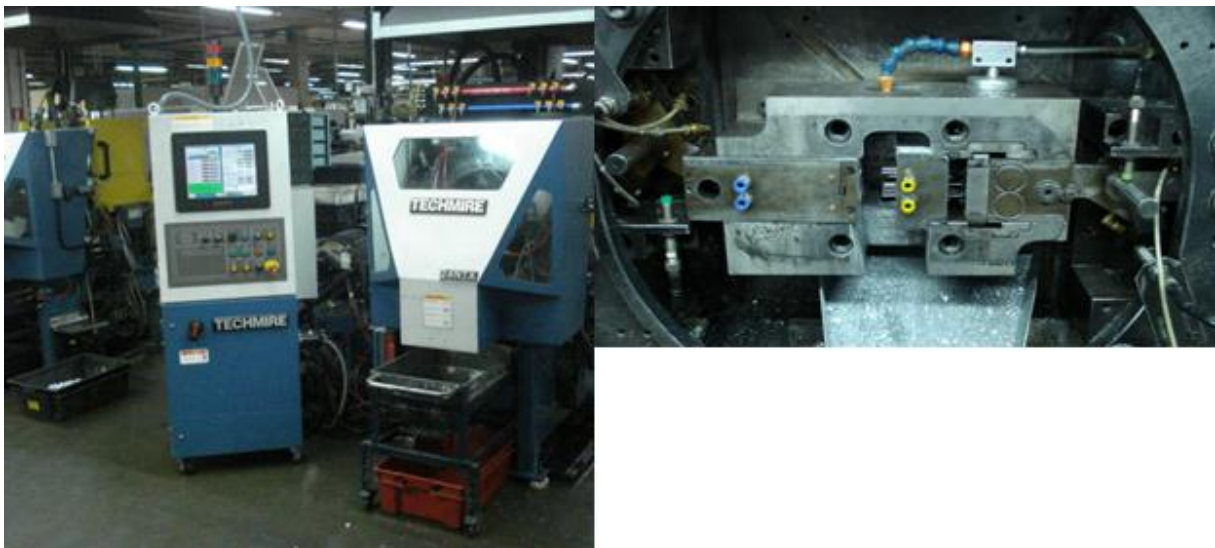
mesmo dia para garantir que as folgas presentes do sistema hidráulico no momento da injeção não interferissem nos resultados, estas folgas representam desgastes nos anéis e camisas de injeção reduzindo a capacidade de injeção da máquina, provocando falhas de preenchimento. Os parâmetros utilizados para os dois casos foram os listados na tabela do Apêndice 14. A fim de comparação, somente o ciclo/minuto foi alterado, onde foi ajustado até o ponto em que se obteve o melhor acabamento superficial nos dois casos.

Figura 26 – Placa das marcas, modelo 1 (A) e modelo 2 (B)..



Fonte: Autor (2014).

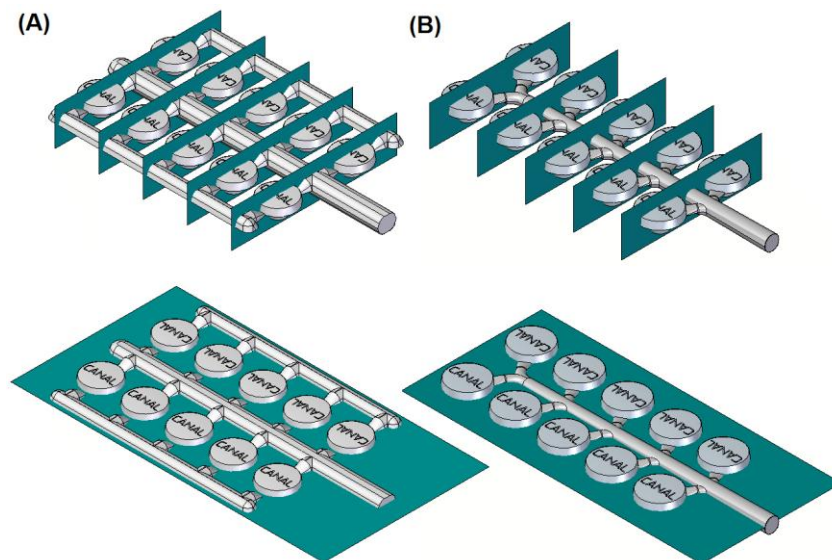
Figura 27 – Techmire 24NTX.



Fonte: Mundial S/A (2014).

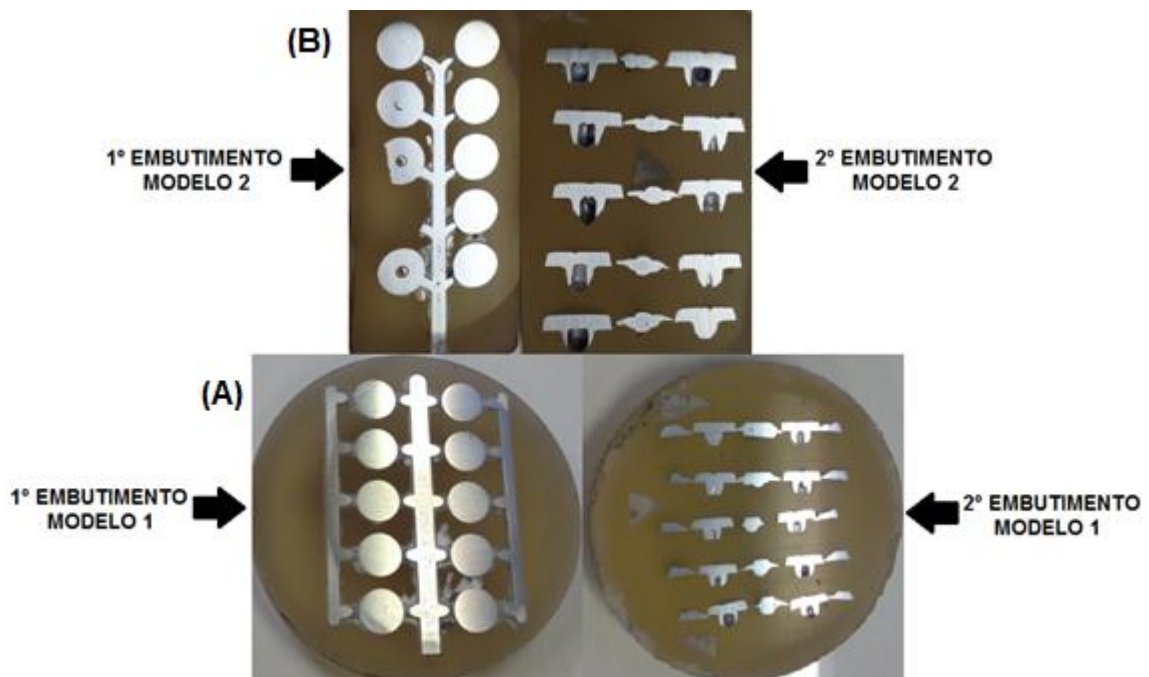
Após a injeção de aproximadamente 10 minutos de cada modelo, os canais com peças e bolsas que seriam analisados foram desganhados manualmente (normalmente são desganhadas em tambor) para não aderir nenhuma impureza ou umidade nas peças. Após, foram cortadas com serra manual nas seções ilustradas na Figura 28 e embutidas a frio (Figura 29), sem promover aquecimento, pois poderia comprometer a microestrutura.

Figura 28 – Seções de corte para análise, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).



Fonte: Autor (2014).

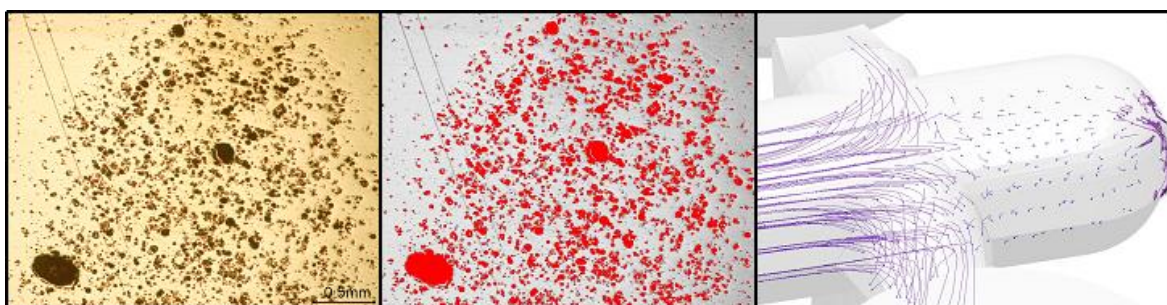
Figura 29 – Embutimentos, modelo 1 (A) e modelo 2 (B).



Fonte: Autor (2014).

As peças embutidas foram lixadas e polidas, sendo possível a análise de porosidade através de imagens com ampliações de 50 vezes. Para cada face foi realizada uma varredura na superfície da peça, buscando sempre a região com maior incidência de defeitos causados por porosidade por gases. Segundo José Viana e Faria Neto (2013), sua aparência se distingue da porosidade por contração por apresentar formato circular (bolhas). A partir destas imagens captadas, o software *Image J 1.49g* permitiu filtrar as imagens e separar as regiões com defeitos, sendo possível compilar a área e circularidade de cada defeito. Um exemplo é mostrado na Figura 30, onde a primeira imagem é a fotografia da amostra do modelo 1 à distância de 65,38 mm do ponto de injeção, a segunda é com o filtro de área para cada defeito e a terceira é a comparação da mesma região com a simulação, a qual mostra o choque que o fluido sofre com o a barreira final do canal, provocando o retorno dos vetores para o sentido do centro do canal e acumulando bolhas de gases nesta região.

Figura 30 – Modelo 1 a 65,38 mm de distância do ponto de injeção.



Fonte: Autor (2014).

Comparando com o modelo 2, nota-se a diferença no número de defeitos e área dos mesmos. Na Figura 31 é ilustrada a mesma região com escoamento menos turbulento e sem retorno de material para o centro do canal, o que gera menos defeitos por porosidade de gases.

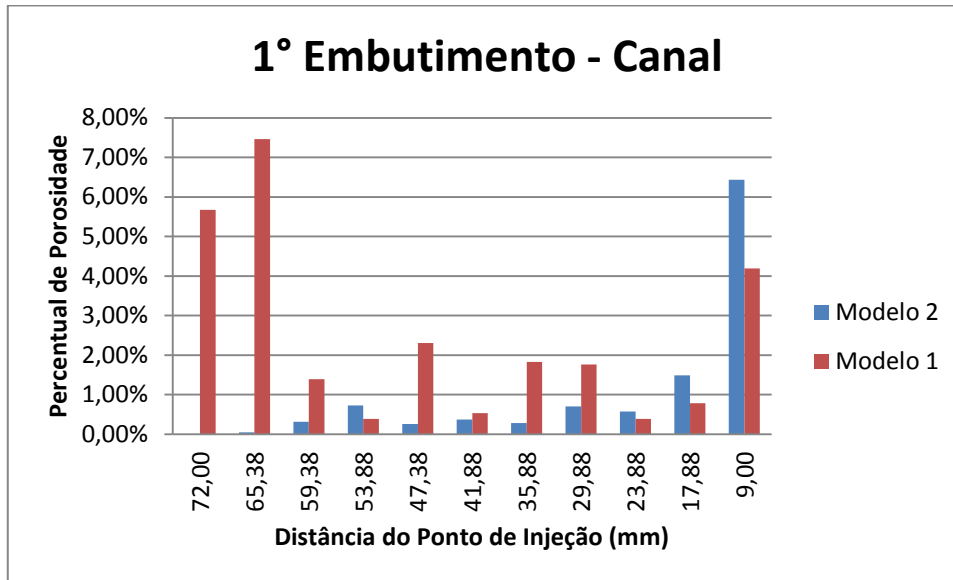
Figura 31 – Modelo 2 a 65,38 mm de distância do ponto de injeção.



Fonte: Autor (2014).

A Figura 32 mostra a distribuição dos defeitos ao longo do canal de distribuição, relacionando o percentual de porosidade encontrado em cada imagem com a distância do ponto de injeção do molde. Observa-se que o modelo 2 supera o 1 somente no início do canal de distribuição e diminui ao longo das cavidades.

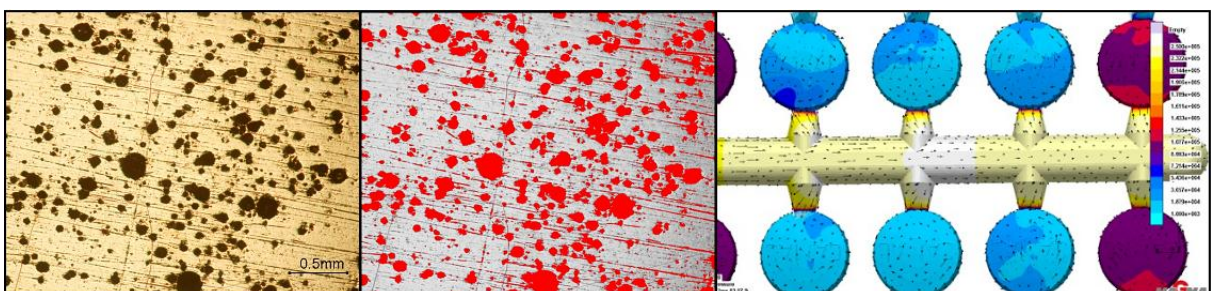
Figura 32 – Gráfico percentual de porosidade x distância do ponto de injeção.



Fonte: Autor (2014).

Outra região onde esta comparação foi feita é a parte central do canal, à distância de 47,38 mm do ponto de injeção. Na Figura 33, as porosidades estão evidentes na forma circular e podemos caracterizar como sendo o efeito do “golpe de aríete”, pois o choque, citado anteriormente, no final do canal faz com que o escoamento de metal retorne para o centro do canal, de encontro com a pressão de injeção que a máquina produz para preencher completamente o molde. Neste caso o encontro das frentes de material se dá na parte central do canal de distribuição, promovendo turbulência e aprisionamento de ar.

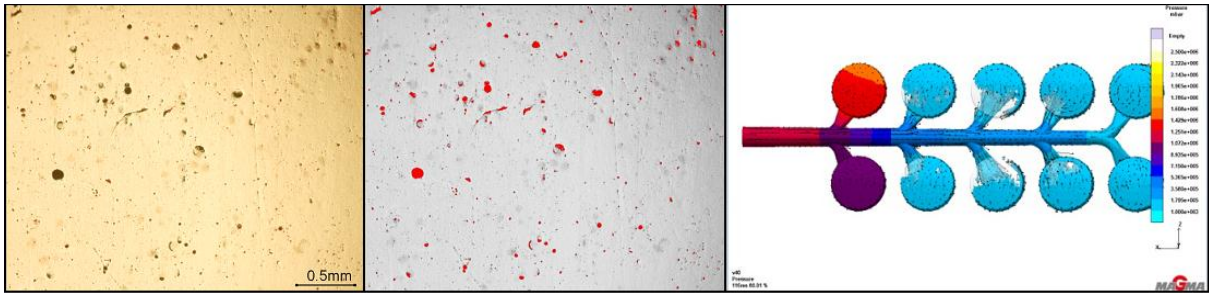
Figura 33 – Modelo 1 à distância de 47,38 mm do ponto de injeção.



Fonte: Autor (2014).

Já no modelo 2 (Figura 34), o “golpe de aríete” não é percebido na simulação, somente um aumento da pressão à distância de 9 mm do ponto de injeção no final do preenchimento. Este aumento está especificado na Figura 32. Os demais gráficos para todos os embutimentos e regiões analisadas estão no Apêndice 15.

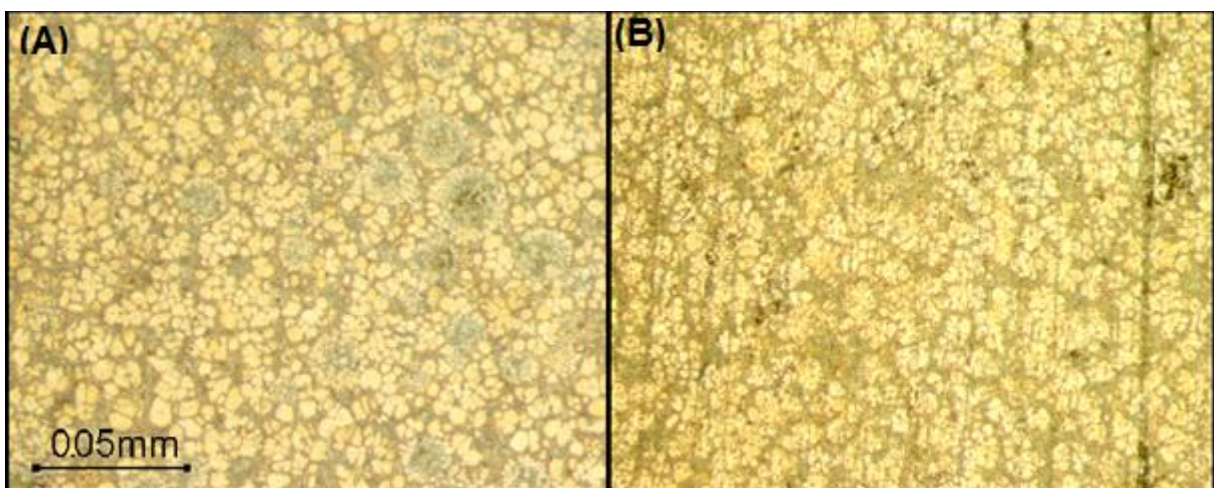
Figura 34 – Modelo 2 à distância de 47,38 mm do ponto de injeção.



Fonte: Autor (2014).

A microestrutura foi avaliada através de metalografia, com ataque químico de 5 ml de HNO_3 , 100 ml de H_2O , onde foi possível verificar que a porosidade presente não é do tipo vermicular, pois apresenta características de porosidade formadas no momento do preenchimento, através de retenção e liberação de gases ao longo da solidificação, pelo seu formato circular. Na Figura 35 pode-se notar que o modelo 2 apresenta tamanho de grãos menores em relação ao modelo 1.

Figura 35 – Modelo 1 (A) e modelo 2 (B) – 500x.

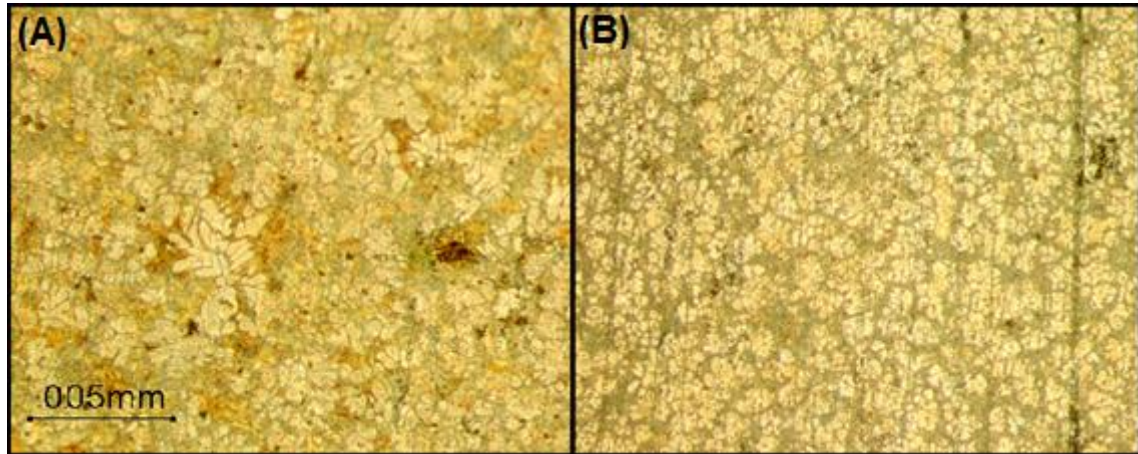


Fonte: Autor (2014).

A Figura 36 apresenta a microestrutura do canal modelo 2, onde observa-se o crescimento dendrítico dos grãos no início do preenchimento, por possuir seção maior que no

final do canal, por solidificar por último e por estar próximo ao *goosneck* da injetora, que está à temperatura de 460 °C.

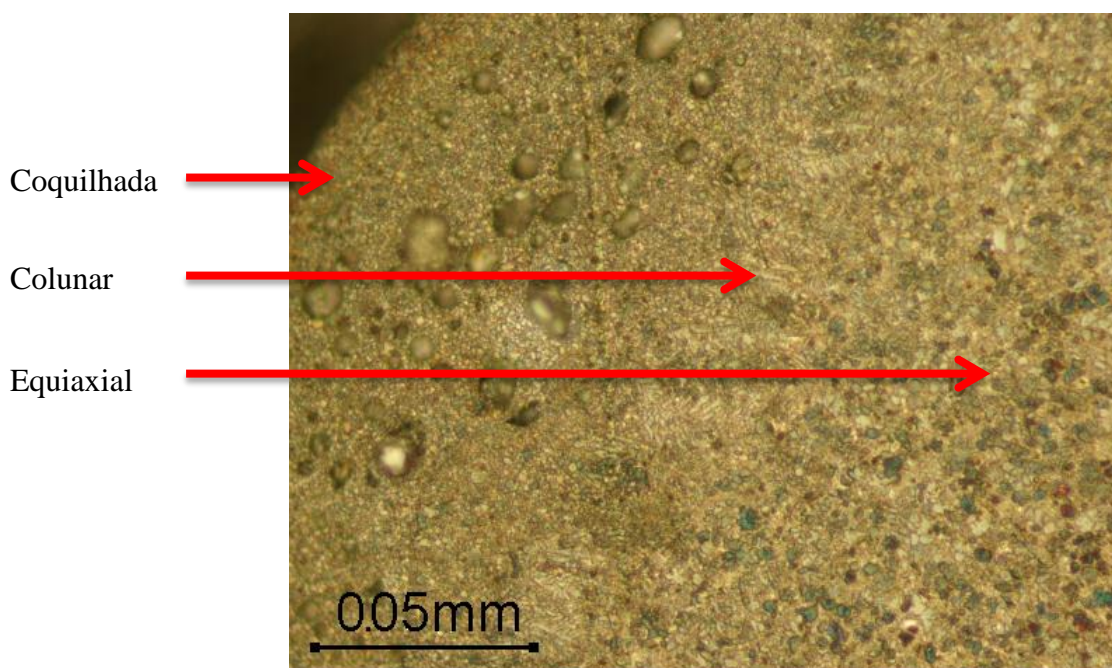
Figura 36 - Modelo 2, início do canal (A) e no final (B) – 500x.



Fonte: Autor (2014).

Na Figura 37 observar-se a região coquilhada ou superfície da peça produzida com o modelo 1. Esta possui grãos pequenos e baixa diferença de temperatura, a região colunar onde se dá o crescimento dos grãos e a região equiaxial da microestrutura, que possui uma maior gradiente de temperatura e grãos maiores. Nesta imagem podemos ver a porosidade no formato circular.

Figura 37 - Modelo 1, regiões da microestrutura – 500x.



Fonte: Autor (2014).

Foram produzidos lotes com ordens de produção (além das quantidades produzidas para teste), a fim de verificar o andamento “natural” de produção dos itens, relacionando com a quantidade de sucatas geradas somente pelo critério “falha de injeção por bolhas”. As quantidades estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 – Quantidade produzida x refugo.

	Produzido	Refugo	Índice	Ciclo	Peso Canal
Modelo 1	1.887.157	354.534	18,8%	10,8 c/min	13,5 g
Modelo 2	3.900.409	107.090	2,7%	17 c/min	3,25 g

Fonte: Adaptado de “Análise_refugo_convencional”, Mundial SA (2014).

Foram produzidos lotes nos dois modelos de moldes, após foi dado banho galvânico, onde 18,8% das peças injetadas no modelo 1 foram refugadas no processo produtivo somente pelo critério por falha de injeção causada por bolhas. No modelo 2, as peças produzidas foram injetadas e banhadas apresentando 2,7% de refugo, apresentando queda significativa de refugo.

Os testes foram realizados ajustando o ciclo a fim de retirar a melhor qualidade de peça nos dois modelos. No modelo 1 a melhor qualidade visual ficou em 10,8 ciclos por minuto enquanto que o modelo 2 apresentou 17 ciclos por minuto. O peso do canal reduziu de 13,5 g para 3,25 g, por ser características de produção em massa, a qual possui grandes quantidades e baixo valor agregado, a pequena mudança de massa no canal resultou na redução de consumo de 4 toneladas de material utilizado na injeção.

4 CONCLUSÃO

As ferramentas de simulação do processo de fundição sob pressão têm exercido importantes mudanças na confecção de moldes de injeção, contribuindo para a compreensão de fenômenos que ocorrem no escoamento de fluidos, auxiliando os projetistas no desenvolvimento de novos projetos e melhorias dos atuais, permitindo detectar falhas nos seus instantes iniciais e reduzindo o ciclo de desenvolvimento e confecção do ferramental.

O presente trabalho teve como objetivo a melhoria da qualidade de uma peça de zamac fundida sob pressão, por meio da redução da porosidade por bolhas presente nas peças. Ficou evidenciado pela observação da simulação que o processo atual possuía regiões de recirculação de metal líquido que promoviam o aprisionamento de ar e concentração de material pela injeção em determinadas áreas, prejudicando o escoamento contínuo de material para o interior das cavidades, resultando em perdas de velocidade e acelerações repentinas. Após aplicar modificações no projeto inicial, como a redução da secção ao longo das cavidades, alteração do ângulo e área de fluxo dos canais de ataque, redução da distância das cavidades em relação ao canal central e redimensionamento e reposicionamento dos escapes de gases, o comportamento geral do escoamento permitiu o rápido preenchimento das cavidades, com menos pontos de recirculação de metal e com evacuação do ar aprisionado de forma eficiente.

Pela facilidade de alteração da geometria e simulação de hipóteses, foi possível a variação de parâmetros isoladamente e posterior junção de todas para uma configuração final, a fim de obter um modelo que se aproximasse da máxima eficiência de um molde de injeção.

Com a produção de aproximadamente 3,9 milhões de peças através da matriz do modelo 2 verifica-se que a redução de lotes sucateados pelo critério de bolhas por injeção diminuiu de forma significativa, reduzindo consideravelmente a presença de porosidade no canal de distribuição e nas peças. Permitiu ainda o aumento de 57,4% no ciclo de produção, de 10,8 para 17 ciclos por minuto e reduzindo a massa dos canais de injeção de 13,5 g para 3,25 g, o que representa aproximadamente 4 toneladas de redução de uso de matéria-prima para este estudo.

Além da redução dos retrabalhos e atrasos nos lotes, este estudo auxiliou a compreensão de fenômenos que acontecem no interior da cavidade, que até então eram obstáculos no desenvolvimento de novos produtos e conseqüentemente novos moldes. Aliado à simulação do escoamento, foi possível reduzir o tempo de desenvolvimento de um produto

de qualidade através da redução do tempo de *try-out* de moldes, que englobam todos os processos de alteração e ajuste de um molde de injeção.

Para trabalhos futuros são propostas as seguintes abordagens:

- Análise da sensibilidade de cada alteração da geometria;
- Maior variação dos parâmetros de geometria;
- Utilização de um algoritmo que permita a alteração das diversas variáveis geométricas para otimização do tempo de projeto;
- Análise e otimização dos parâmetros de injeção aplicados na prática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM INTERNACIONAL, **B240 – 13, Standard Specification for Zinc and Zinc-Aluminum (ZA) Alloys in Ingot Form for Foundry and Die Casting**, West Conshohocken, PA, 2007.

BOUCHARA J. C., ZANETIC V. L. C., HELLMEISTER A. C. P. **Cálculo Integral Avançado**. 2ª Edição, EdUSP, 1996, 371 p.

DIE CASTING - **Ligas de Alumínio - Especificação de liga de alumínio para fundição**. Disponível no site <http://www.diecasting.org/dce>, acessado em 28 de abril de 2014.

DIE CASTING, - **Preservação dos moldes de injeção, apresentando pouco desgaste aos moldes de injeção**. Disponível em www.diecasting.org/dce, acessado em 28 de abril de 2014.

DIE CASTING, - **Fundição de zamac apresentado com baixo ponto de fusão**. Disponível em www.diecasting.org/dce, acessado em 28 de abril de 2014.

DIECKHUES G. W.; STURM J. C.; SIKORSKI S. **Systematic optimization of aluminum sand casting gating systems**. MAGMA Foundry Technologies, Inc., Schaumburg, IL, 2012.

FLEMINGS, M.C. **Solidification processing**. McGraw-Hill, New York. 1974. p. 101.

FOX, R.W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2006. 798 p.

HANSEN, P. N.; FLENDER, E.; STURM, J. C. **Casting Process Simulation: from the idea 30 years ago to reality today**. MAGMA Giessereitechnologie GmbH, Aachen, Alemanha, 2009.

HENRY, H.; ARGYROPOULOS, S. A. **Mathematical modelling of solidification and melting: a review**. v.4, Bangalore, 1996, p.371-396.

MALAVAZI, J. **Manual de Fundição sob Pressão**. Presidente Altino, SP. Votorantim Metais, 2010. 21 p.

MARQUES, A.C. **Desenvolvimento de modelo numérico utilizando o método dos volumes finitos em malhas não-estruturadas**. Vitória. 2005. 93 p. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Espírito Santo.

MARQUES, A.I.G.C.M. **Diagnóstico de um defeito de fundição. Aplicabilidade da simulação numérica em FLOWCast para previsão e resolução de defeitos**, Porto. 2008. 74 p. Dissertação de mestrado - Universidade do Porto.

MENGES, G; MOHREN, P. **How to make injection moulds**. Oxford University Press, USA. 1993. 560 p.

OLIVEIRA, F. C. G. D. **Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo spaceframe usando método dos elementos finitos e métodos heurísticos**. Uberlândia. 2007. 130 p. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York, McGraw Hill Book Company, 1980.

PEGDEN, C.D. et al. **Introduction to simulation using SIMAN**. NY: McGraw-Hill, 2nd ed, 1990.

PEREIRA, A. M. B. **Simulações Computacionais em Engenharia**. Revista Memo. Rio de Janeiro, n. 6, p.56-71, set. 2009.

SCHMIDT, J. **Seminário de Projeto e Processo para Fundição Sob Pressão**. 2013.

SOARES, O. J. A. **Melhorias De Produto / Processo Pela Utilização De Ligas De ZAMAC**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, São Paulo, 2008. 167 f.

VERSTEEG, H K; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method**. 2. ed. Harlow, England. Pearson Education Limited, 2007. 517 p.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics**. Pearson Education Limited, second edition, 2007, 503 p.

VIANA D. J.; FARIA NETO A. **Otimização do processo de fundição sob pressão aplicando o Método de Taguchi**. Revista Produção Online, Florianópolis, SC, v.13, n. 4, p. 1435-1465, out./dez. 2013.

VOLLER, V. R. **Advances in Numerical and Heat Transfer: Chapter Nine**. CRC Press, v.1. 1996, 341-375

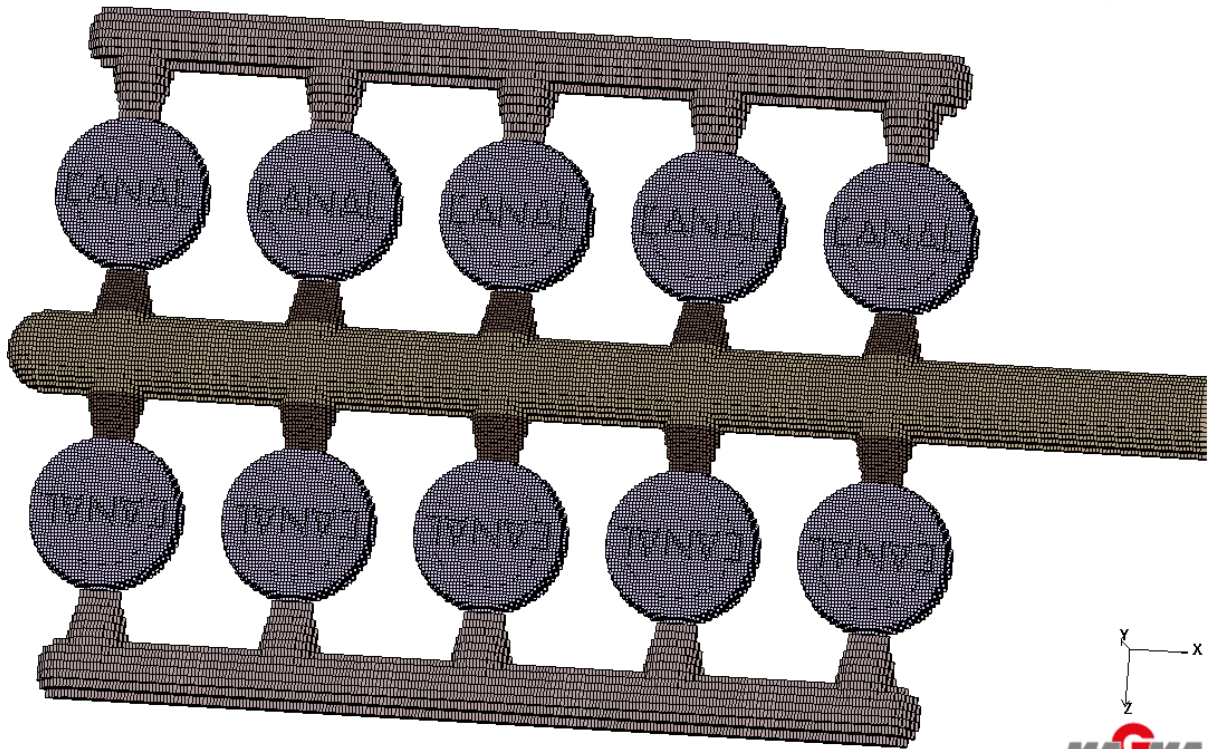
VOLLER, V. R.; PRAKASH, C. **A Fixed-Grid Numerical Modeling Methodology for Convection-Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems**. International Journal of Heat Mass Transfer. v. 30, 1987. p.1709–1720

WALKINGTON, W. **Gas Porosity: A guide to correating problems**. Wheeling: North American Die Casting Association, 2006

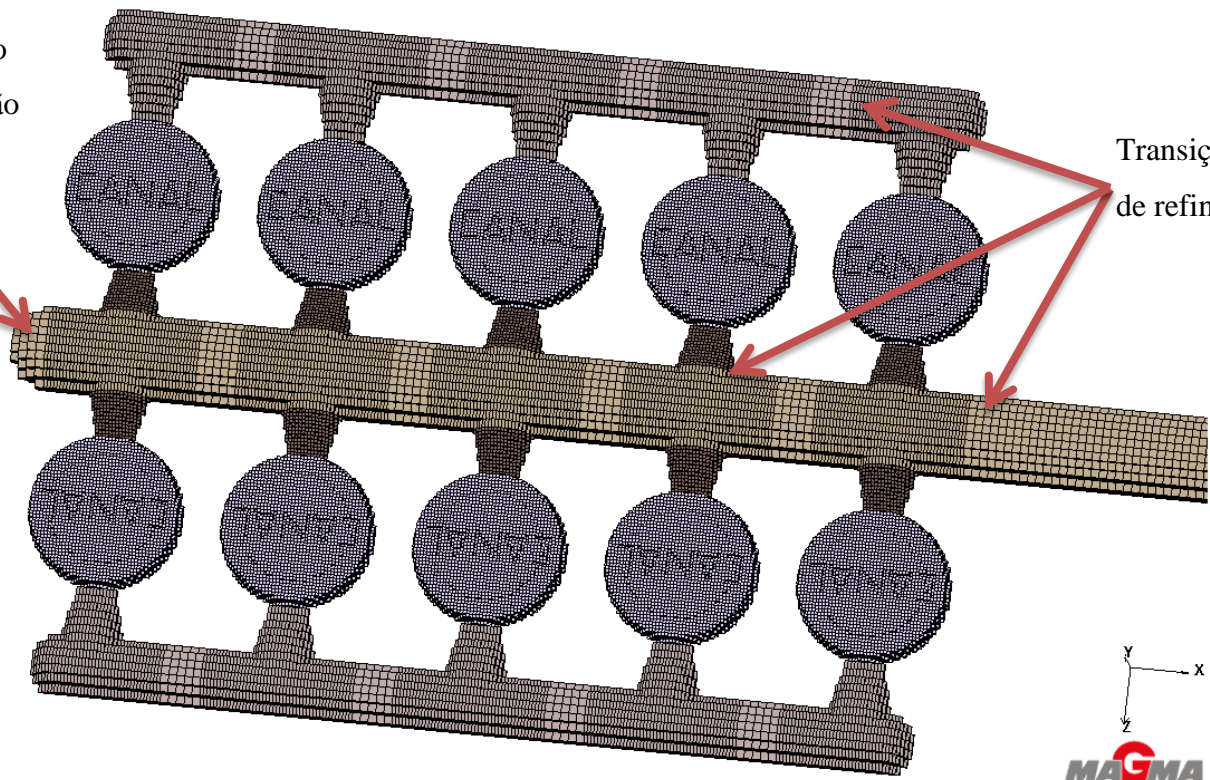
<http://www.minaszinco.com.br/ambiente.htm>, **Definição de zamac e seus elementos**, São Paulo, 2007, acessado em 28 de abril de 2014.

<http://www.tratho.com.br/pdf/Zamac.pdf>, **Histórico do zamac**. Mogi das Cruzes, SP, acessado em 28 de abril de 2014.

APÊNDICE 1 – MALHA DE PROJETO DE CANAIS 1.



Refinamento de parede não representa o contorno do modelo



Transições bruscas de refinamento

APÊNDICE 2 – CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS.

- Diâmetro hidráulico do canal de ataque:

$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4(0,03 \cdot 0,0004)}{2(0,003 + 0,0004)} = 7,06 \times 10^{-4} \text{ m}$$

A = área do canal

P = perímetro do canal

- Interpolação da viscosidade cinemática para a temperatura de 459,4 °C:

T (°C)	v (m²/s)
405	2,5x10⁻⁶
459,4	1,18x10⁻⁶
500	1,9x10⁻⁷

Fonte: Autor (2014).

T = temperatura

v = viscosidade cinemática

- Cálculo do número de Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{125,7,06 \times 10^{-4}}{1,18 \times 10^{-6}} = 7,48 \times 10^7$$

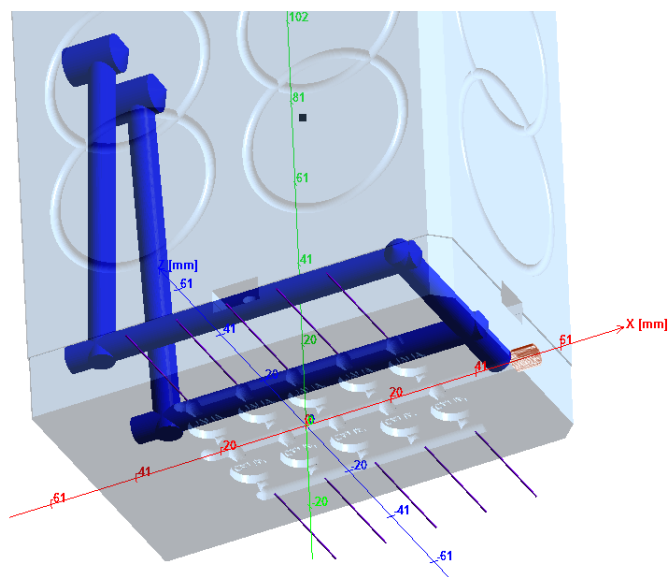
v = velocidade do fluido em m/s

APÊNDICE 3 – PERSPECTIVA DE GEOMETRIA.

Name	Bool	Material
Ferramenta de Rebites_Techmire_24NTX		
{ Lado Fixo		
Cover_Die	* 0	Cover Die/ID 1
Cover_Die_Cabecote	* 0	Cover Die/ID 2
{ Lado Móvel		
Ejector_Die	* 0	Ejector Die/ID 1
Ejector_Die_Adaptador	* 0	Ejector Die/ID 3
Ejector_Pin	* 0	Ejector Pin/ID 1
{ Refrigeração		
Temp_Ejector_Die	* 0	Tempering Channel/ID 1
Temp_Cabecote	* 0	Tempering Channel/ID 2
{ Canais e Canal de Ataque		
Runner	* 0	Runner/ID 1
Ingate	* 0	Gate/ID 1
{ Bolsas		
Overflows	* 0	Overflow/ID 1
{ pecas		
Casting_1	* 0	Casting/ID 1
Casting_2	* 0	Casting/ID 2
Casting_3	* 0	Casting/ID 3
Casting_4	* 0	Casting/ID 4
Casting_5	* 0	Casting/ID 5
Casting_6	* 0	Casting/ID 6
Casting_7	* 0	Casting/ID 7
Casting_8	* 0	Casting/ID 8
Casting_9	* 0	Casting/ID 9
Casting_10	* 0	Casting/ID 10
inlet_on_surface_001	* ✓	Inlet/ID 1
{ Vents		

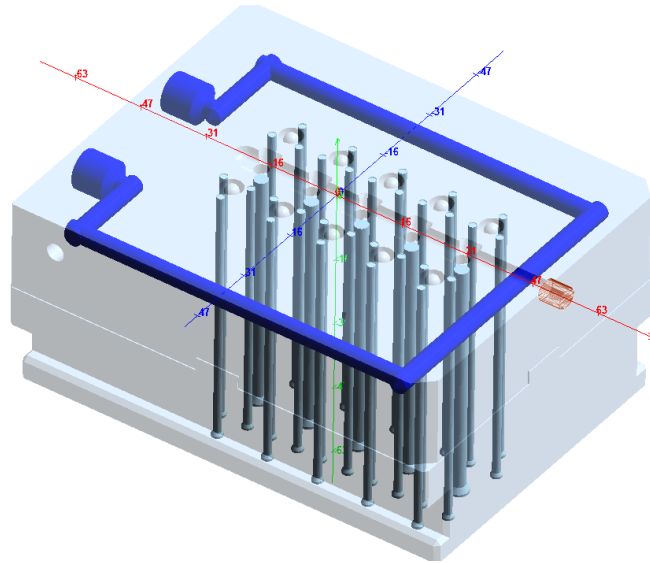
Fonte: Autor (2014).

APÊNDICE 4 – LADO FIXO DO MOLDE.



Fonte: Autor (2014).

APÊNDICE 5 – LADO MÓVEL DO MOLDE.



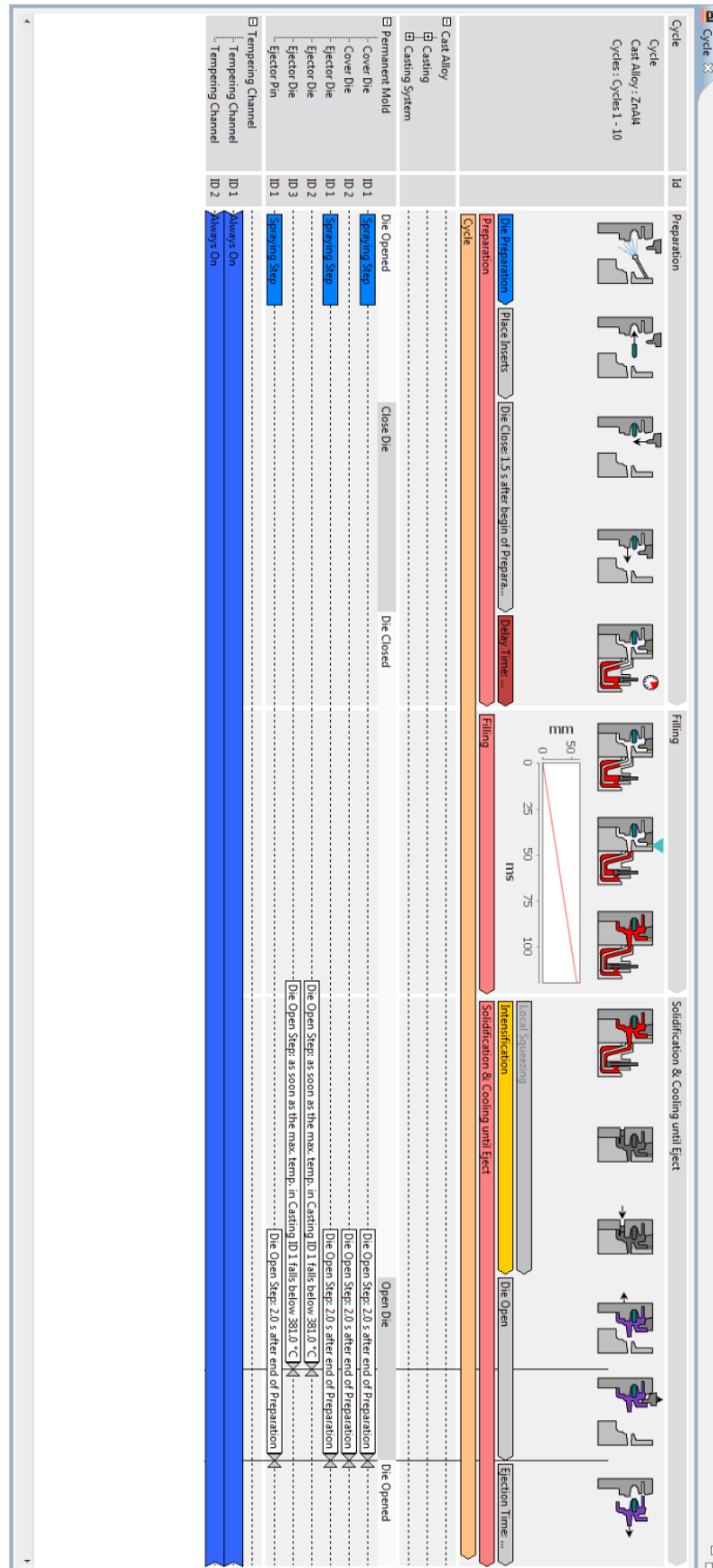
Fonte: Autor (2014).

APÊNDICE 6 – DIMENSÕES DOS VOLUMES DE CONTROLE.

Parameters Sets	Element Dimensions Cartesian Mesh Parameters (mm)		
	X	Y	Z
Standart			
Cover Die ID1	5	5	5
Cover Die ID2	5	5	5
Ejector Die ID1	5	5	5
Ejector Die ID2	5	5	5
Ejector Die ID3	5	5	5
Ejector Pin ID1	5	5	5
Temp			
Tempering Channel ID1	3	3	3
Tempering Channel ID2	3	3	3
Overflows			
Overflow ID1	0,8	0,8	0,8
Runner			
Runner ID1	0,4	0,5	0,5
Casting			
Casting ID1	0,25	0,3	0,3
Casting ID2	0,25	0,3	0,3
Casting ID3	0,25	0,3	0,3
Casting ID4	0,25	0,3	0,3
Casting ID5	0,25	0,3	0,3
Casting ID6	0,25	0,3	0,3
Casting ID7	0,25	0,3	0,3
Casting ID8	0,25	0,3	0,3
Casting ID9	0,25	0,3	0,3
Casting ID10	0,25	0,3	0,3
Ingate			
Ingate	0,25	0,2	0,2
Number of Cells	2.628.646		
Number of Cavity Cells	151.689		

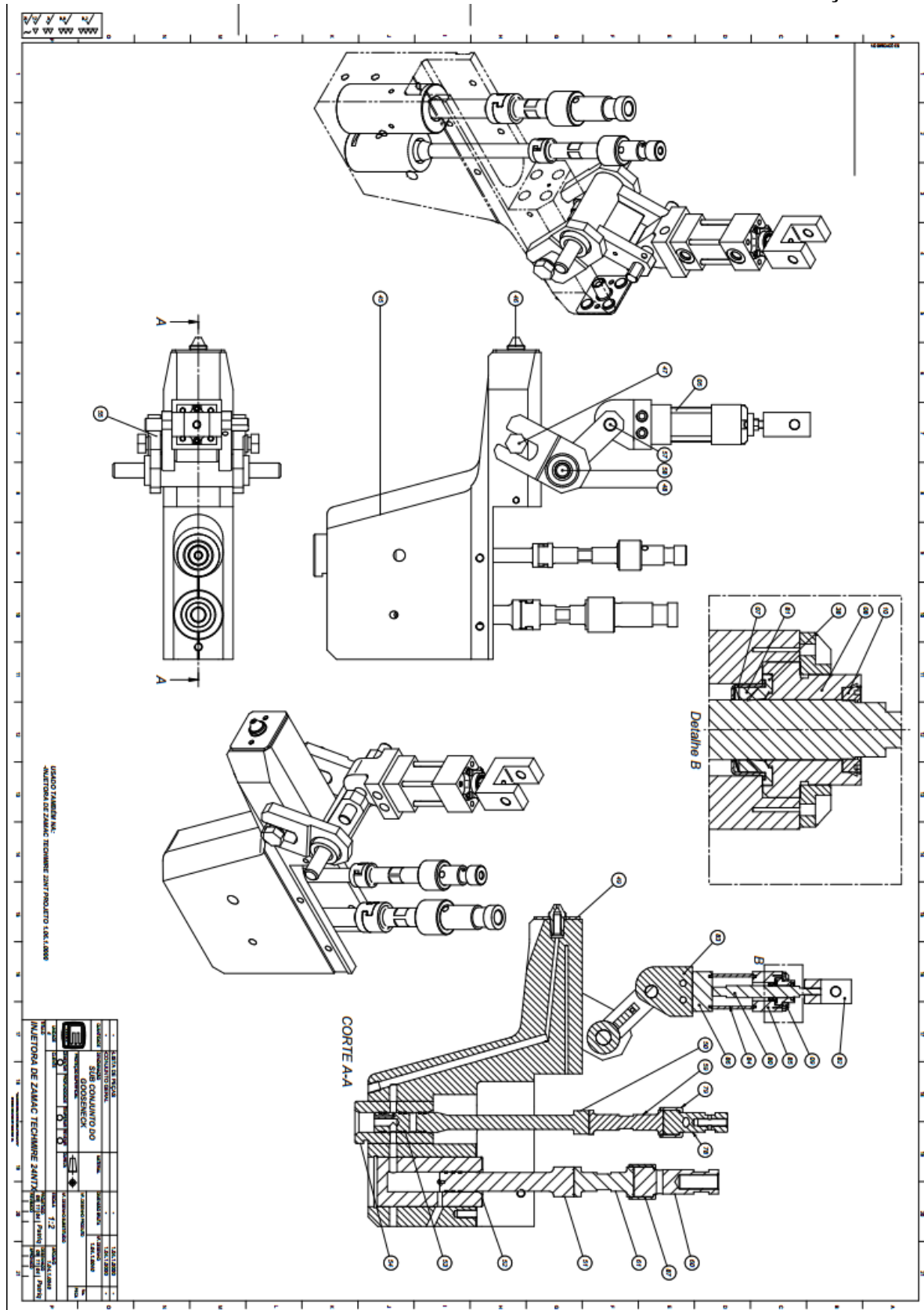
Fonte: Autor (2014).

APÊNDICE 7 – PARÂMETROS DE CICLO.



Fonte: Autor (2014).

APÊNDICE 8 – ACIONAMENTO DO CILINDRO E PISTÃO DE INJEÇÃO.



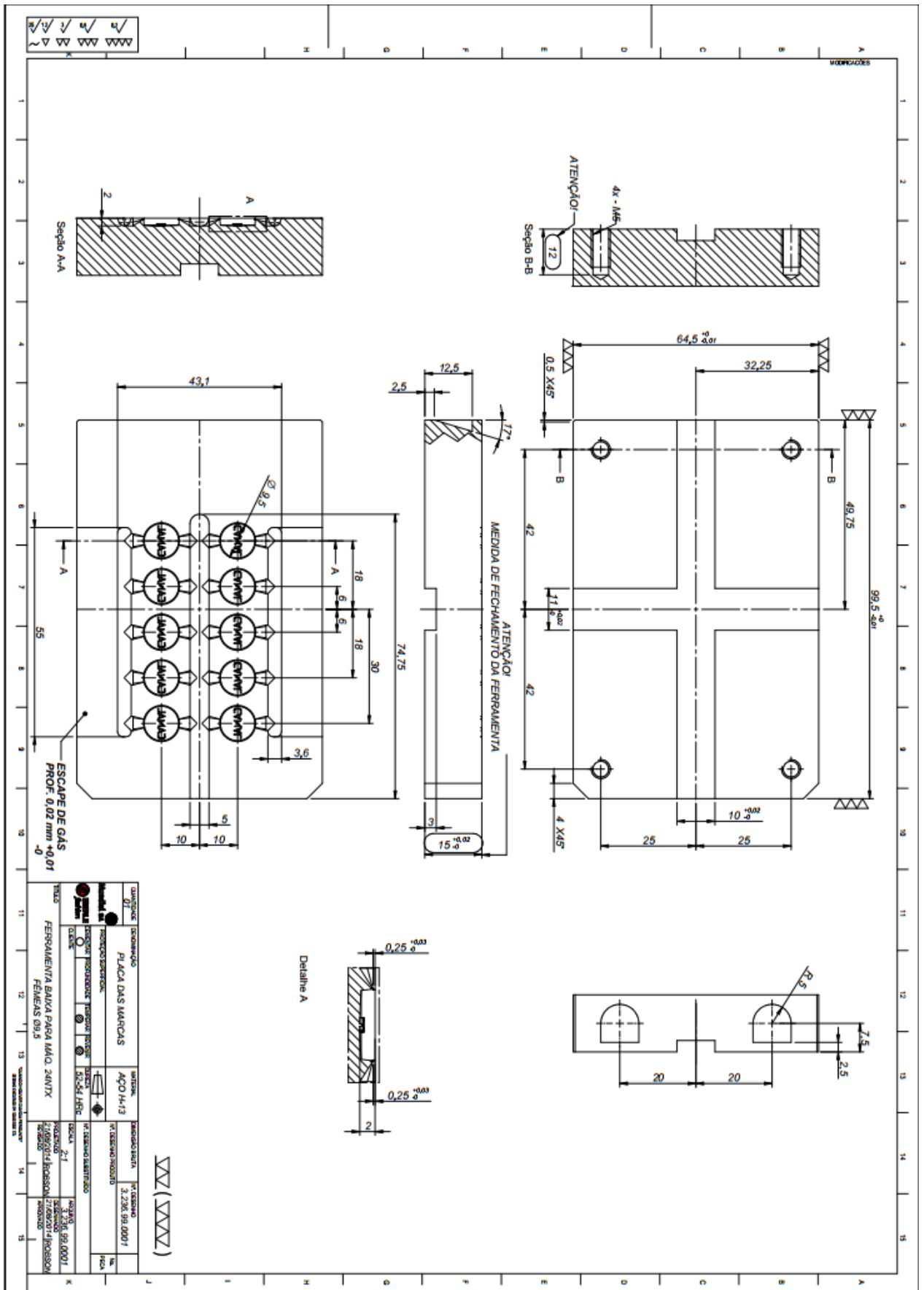
Fonte: Autor (2014).

APÊNDICE 9 – PARÂMETROS DA MÁQUINA.

Parâmetros de Injeção Máquina Techmire 24NTX		
Nome	Valor	Unidade
Ciclos	11	ciclos/min
Initial Temperature of Casting (Temperatura Inicial do Material no Bico)	450	°C
Initial Temperature of Cover Die (Temperatura Inicial do Lado Fixo)	100	°C
Initial Temperature of Injector Die (Temperatura Inicial do Lado Móvel)	80	°C
Temperatura da Água de Refrigeração	10 a 15	°C
Looking Force (Força de Fechamento)	70,99	kN
Looking Force (Força de Fechamento Recomendada)	49,30	kN
Max. Shot Camber Length (Comprimento Máximo da Câmara de Injeção)	58	mm
Min. Piston Diameter (Diâmetro Mínimo do Pistão)	25,37	mm
Max. Piston Diameter (Diâmetro Máximo do Pistão)	25,4	mm
Max. Dry Shot Velocity (Velocidade Máxima do Pistão s/ Metal Líquido na Câmara)	1,0414	m/s
Max. Hydraulic Injection Pressure (Pressão Hidráulica Máxima de Injeção (Acumulador) 60 a 80% da pressão de injeção)	28965,5	mbar
Max. Dynamic Injection Force (Força Dinâmica Máxima de Injeção)	5,87	kN
Max. Multi Injection Force (Relação de Translação=Máxima Pressão Final)	5,87	kN
Hydraulic Cylinder Diameter (Diâmetro do Cilindro de Injeção)	50,80	mm
Curso Máximo do Cilindro de Injeção	60,00	mm
Volume do Cilindro de Injeção	0,12161	l
Pressão Específica	280	bar
Max. Piston Acceleration (Aceleração Máxima do Pistão)	52,07	m/s ²
Velocidade Final do Êmbolo	1,0414	m/s
Tempo de Injeção	0,02	s
Peso da Máquina	1700	kg
Espaço Requerido	3x2,8	m
Altura	2,1	m
Número de Funções do Molde	4	
Tamanho Standart do Molde	100x65	mm
Curso Standart do Molde	38	mm
Abertura Total do Molde	38,1	mm
Curso do Pino Ejetor (Molde)	38	mm
Capacidade de Injeção (Teórica)	187	g
Capacidade de Injeção (Recomendada)	93	g
Pressão Máxima na Linha Hidráulica	93	bar
Capacidade do Tanque de Óleo	113,5	litros
Bomba Hidráulica		
Potência do Cadinho	14,5	kW
Capacidade de Metal no Cadinho	127	kg
Potência do Bico Injetor	3,2	kW
Pressão de Ar Requerida	6,9	bar
Velocidade em Vazio (Máx.)	60	ciclos/min
Tensão de Alimentação	380 +- 10%	Volts
Frequência	60	Hz
Número de Fases	3	
Aquecimento	Elétrico	
Refrigeração	Água	

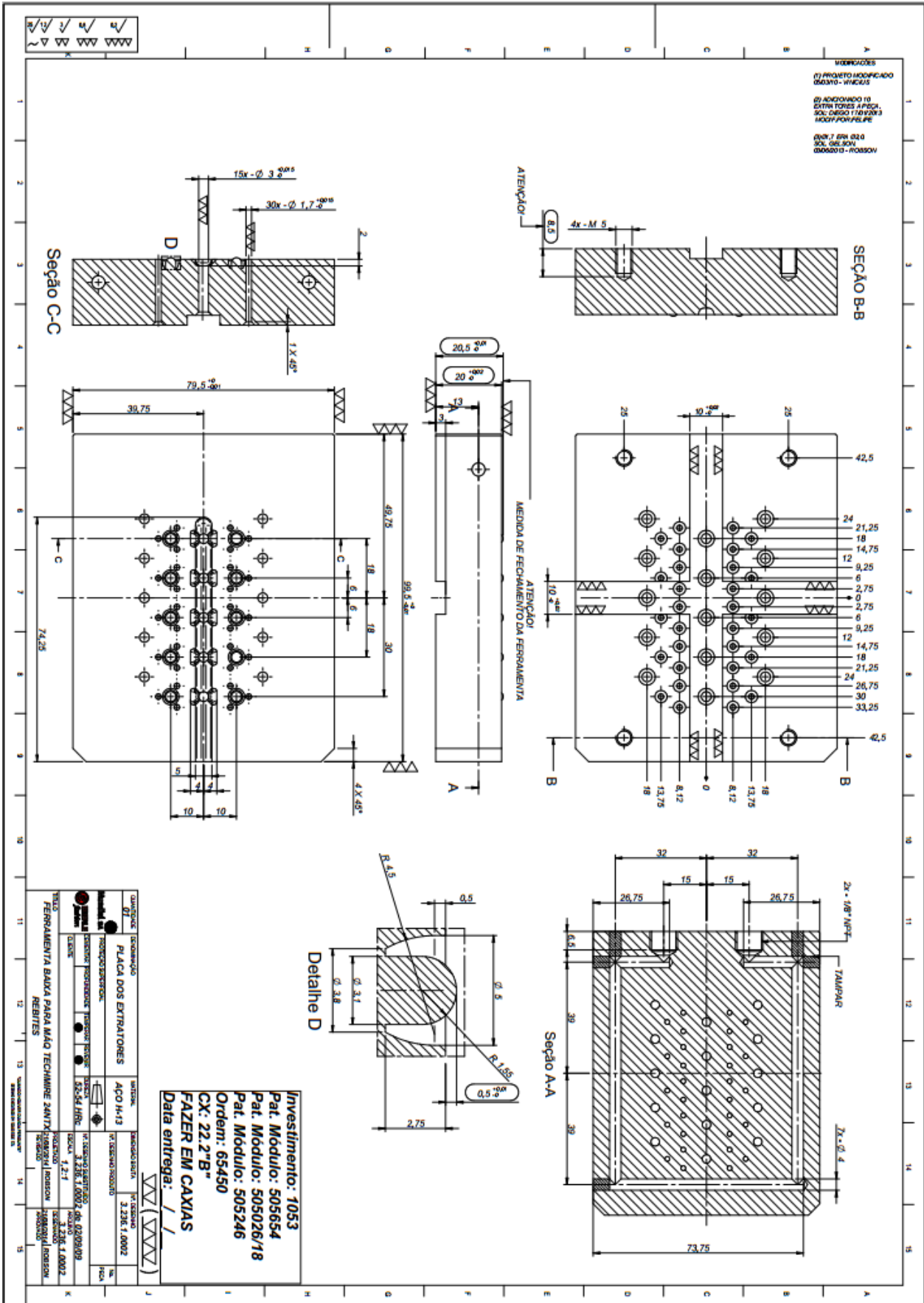
Fonte: Autor (2014).

APÊNDICE 10 – PLACA DAS MARCAS MODELO 1.

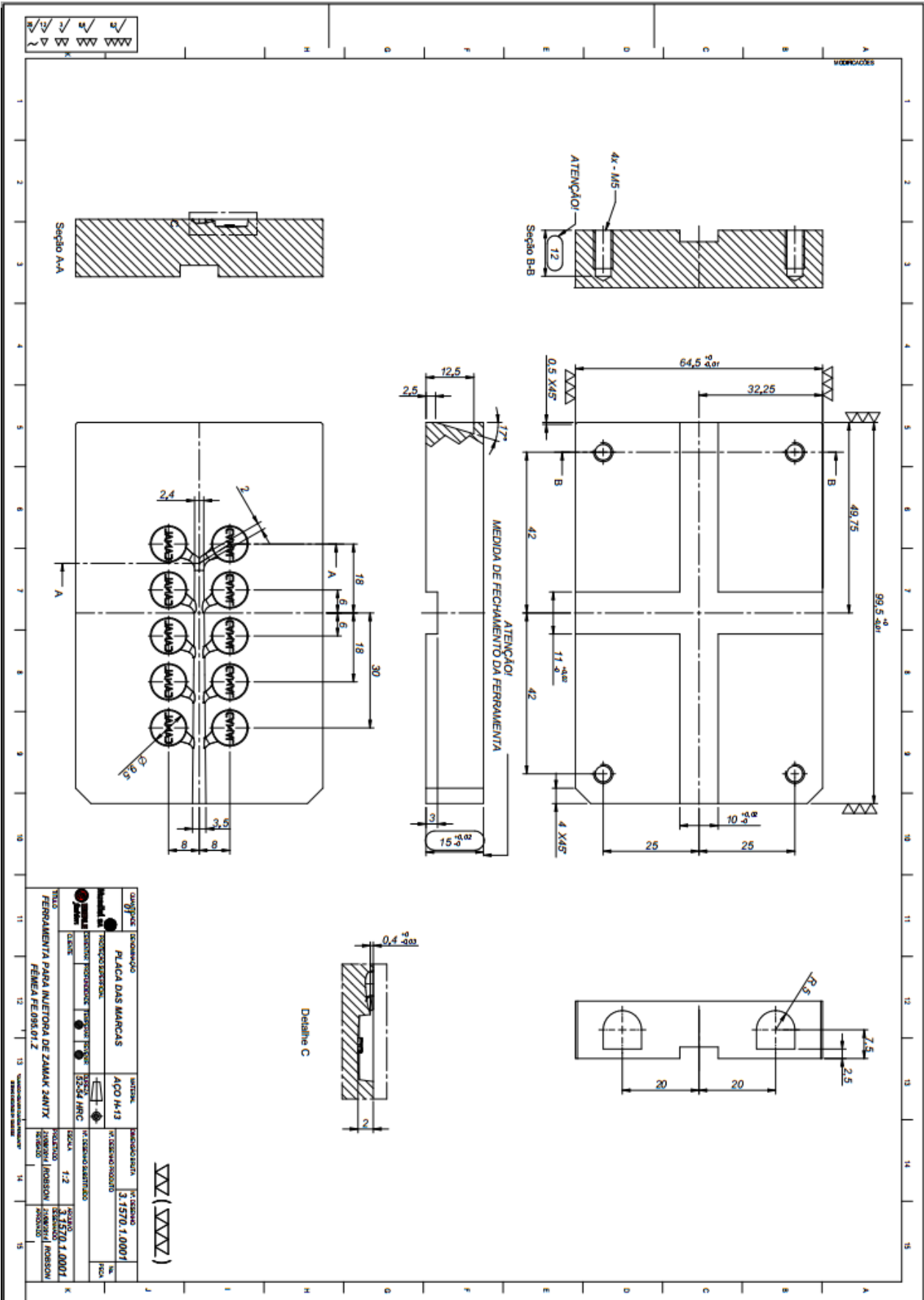


Fonte: Autor (2014).

APÊNDICE 11 – PLACA INFERIOR MODELO 1.



APÊNDICE 12 – PLACA DAS MARCAS MODELO 2.



Fonte: Autor (2014).

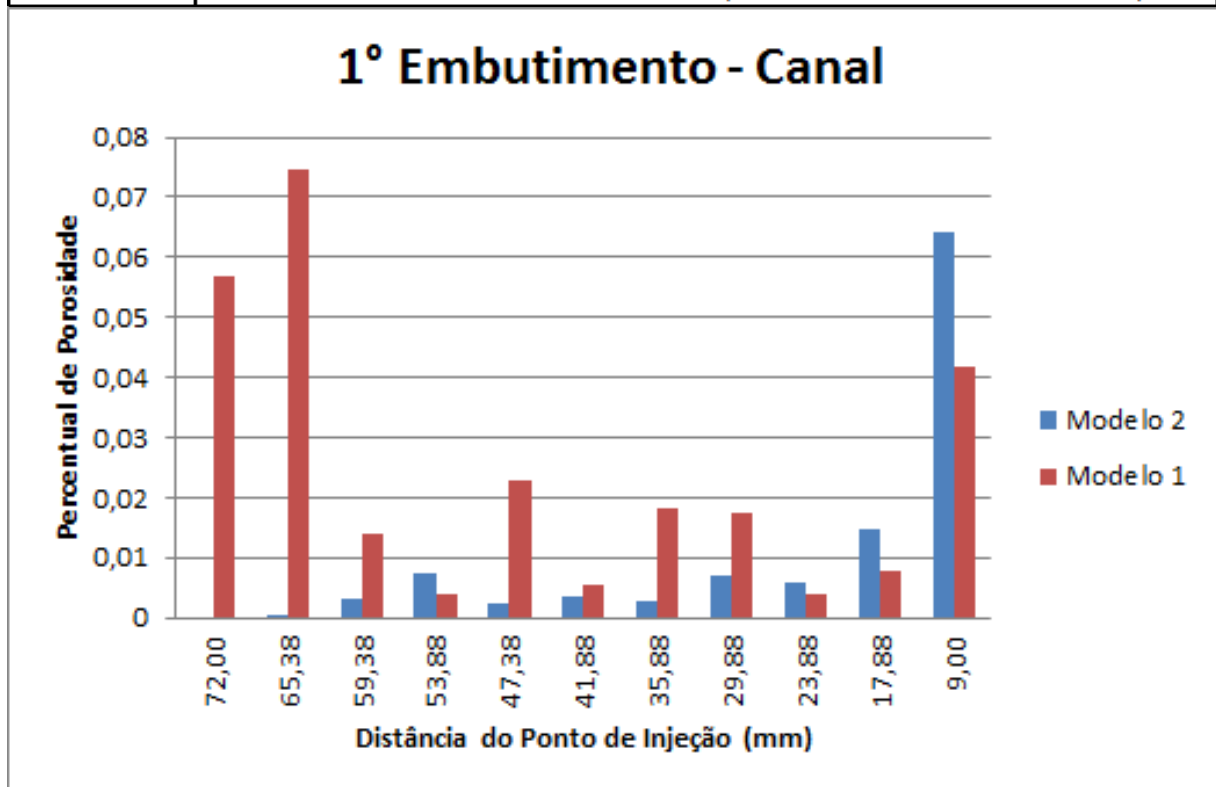
APÊNDICE 14 – PARÂMETROS DE INJEÇÃO PARA OS TESTES.

Parâmetros de injeção para injetoras Techmire		
Sequência de abertura	Modelo 1	Modelo 2
Função F2 (s)	0,2	0,1
Função F1 (s)	0,2	0,1
Tempo de injeção (s)	0,2	0,1
Espera do bico (s)	0,2	0,2
Solidificação (s)	0,2	0,2
Velocidade (s)	2,2	0,1
Sequência de fechamento	Valor	Valor
Função F2 (s)	0,2	0,1
Função F1 (s)	0,2	0,1
Desmoldante	Valor	Valor
Tempo (s)	0,02	0,01
Ciclos	1	1
Extração	Valor	Valor
Ciclos de extração	3	1
Refrigeração	Valor	Valor
Vazão de água	Toda aberta	Toda aberta
Ciclos	Valor	Valor
Ciclos p/ minuto	10,8	17
Temperatura bico injetor (°C)	458	458
Temperatura cadinho (°C)	421	421
Temperatura auxiliar T1 (°C)	423	423
Temperatura câmara (°C)	600	600
Temperatura auxiliar T2 (°C)	486	486
Pressão (Psi)	1000	1000

Fonte: Autor (2014).

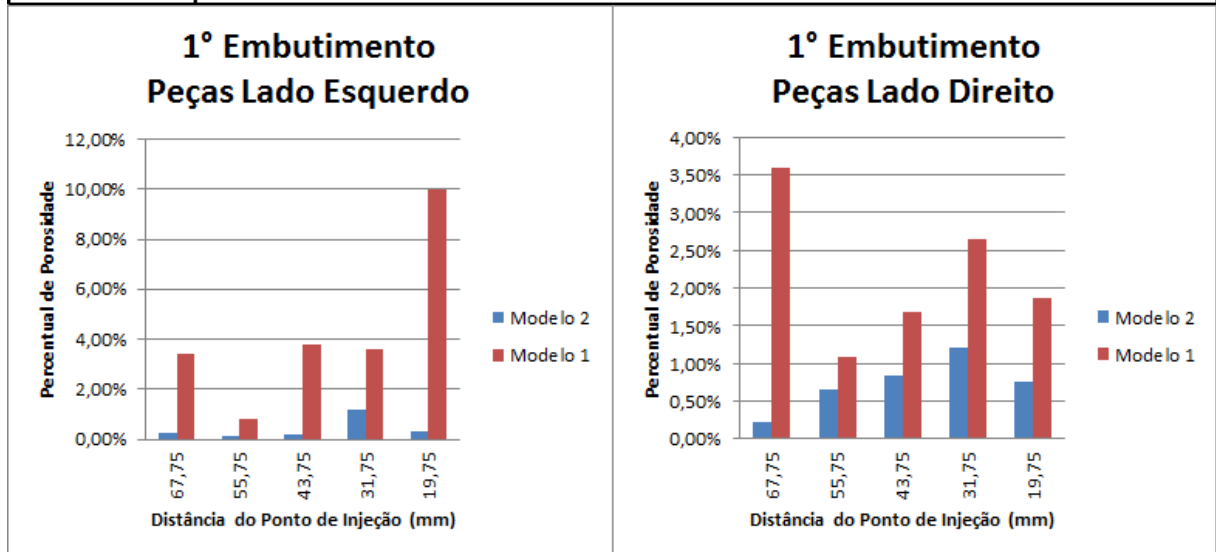
**APÊNDICE 15 – TABELAS DE PERCENTUAL DE POROSIDADE X DISTÂNCIA
DO PONTO DE INJEÇÃO.**

Distância do Ponto de Injeção (mm)		Quantidade	Área Total de Porosidade (mm ²)	Área Média de Porosidade (mm ²)	Circularidade (0-1)	Área Total	Área de Porosidade
1º Embutimento - Canal Novo							
63	1ª Imagem	84	3,47	0,04	0,96	7573	0,05%
57	2ª Imagem	656	23,87	0,04	0,93	7574	0,32%
52	3ª Imagem	1051	54,97	0,05	0,93	7574	0,73%
45	4ª Imagem	375	19,33	0,05	0,94	7574	0,26%
40	5ª Imagem	216	28,27	0,13	0,93	7574	0,37%
34	6ª Imagem	250	21,53	0,09	0,94	7574	0,28%
28	7ª Imagem	493	53,15	0,11	0,89	7574	0,70%
22	8ª Imagem	398	43,59	0,11	0,88	7574	0,58%
16	9ª Imagem	2062	112,67	0,05	0,91	7574	1,49%
8	10ª Imagem	965	487,35	0,51	0,93	7574	6,43%
			Média	0,12		Soma	11,20%
1º Embutimento - Canal Velho							
72	1ª Imagem	2108	429,86	0,20	0,82	7574	5,68%
67,75	2ª Imagem	3854	565,32	0,15	0,83	7574	7,46%
61,75	3ª Imagem	1026	105,62	0,10	0,91	7574	1,39%
55,75	4ª Imagem	230	29,35	0,13	0,84	7574	0,39%
49,75	5ª Imagem	1929	174,55	0,09	0,82	7574	2,30%
43,75	6ª Imagem	370	40,37	0,11	0,82	7574	0,53%
37,75	7ª Imagem	953	138,64	0,15	0,84	7574	1,83%
31,75	8ª Imagem	1214	133,34	0,11	0,88	7574	1,76%
25,75	9ª Imagem	289	29,41	0,10	0,85	7574	0,39%
19,75	10ª Imagem	424	59,20	0,14	0,89	7574	0,78%
10	11ª Imagem	2539	317,46	0,13	1,65	7574	4,19%
			Média	0,13		Soma	26,71%



Fonte: Autor (2014).

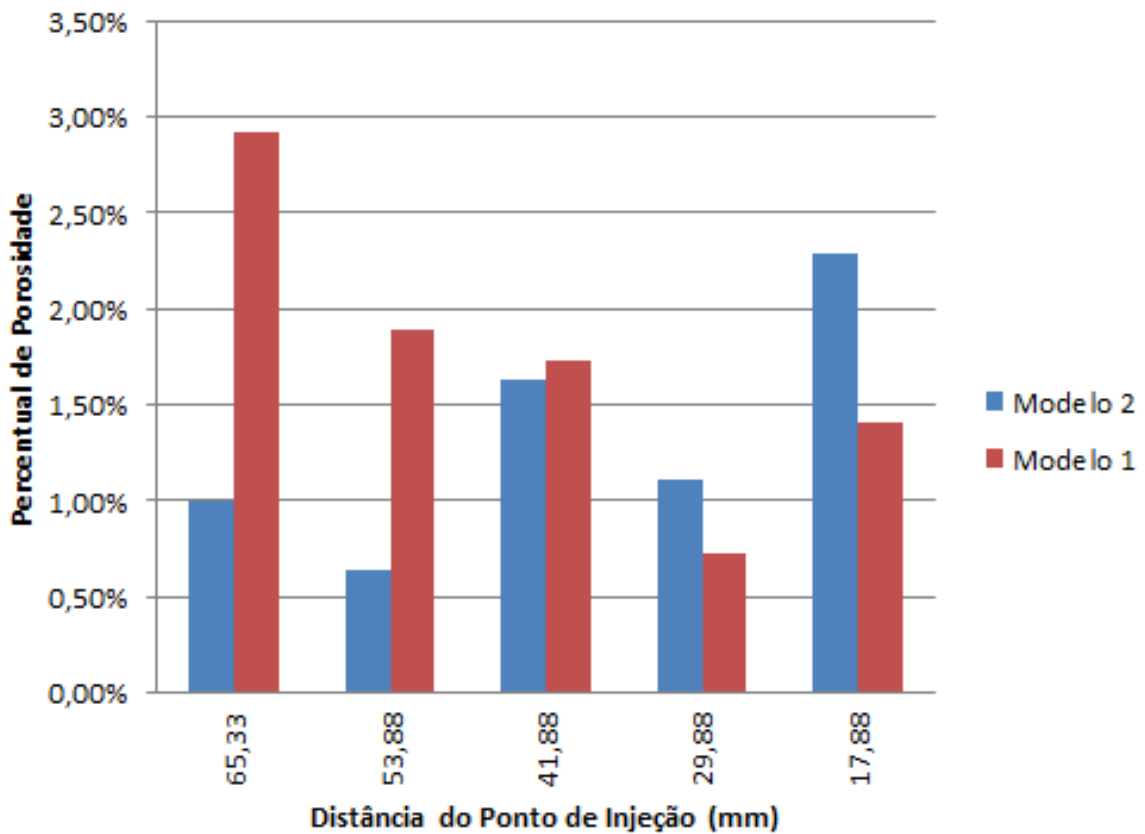
Distância do Ponto de Injeção (mm)		Quantidade	Área Total de Porosidade (mm ²)	Área Média de Porosidade (mm ²)	Circularidade (0-1)	Área Total	Área de Porosidade
1° Embutimento - Peças Novo							
67,75	1ª Imagem	172	18,02	0,10	0,91	7574	0,24%
55,75	2ª Imagem	123	8,86	0,07	0,91	7574	0,12%
43,75	3ª Imagem	257	15,13	0,06	0,95	7574	0,20%
31,75	-	953	91,61	0,10	0,93	7574	1,21%
19,75	5ª Imagem	582	26,31	0,05	0,97	7574	0,35%
67,75	6ª Imagem	226	16,54	0,07	0,89	7574	0,22%
55,75	7ª Imagem	491	48,85	0,10	0,88	7574	0,64%
43,75	8ª Imagem	681	64,07	0,09	0,94	7574	0,85%
31,75	9ª Imagem	953	91,61	0,10	0,93	7574	1,21%
19,75	10ª Imagem	873	57,82	0,07	0,96	7574	0,76%
			Média	0,08		Soma	5,79%
1° Embutimento - Peças Velho							
67,75	1ª Imagem	1898	257,31	0,14	0,94	7574	3,40%
55,75	2ª Imagem	773	62,75	0,08	0,93	7574	0,83%
43,75	3ª Imagem	1824	288,66	0,16	0,84	7574	3,81%
31,75	4ª Imagem	1587	270,94	0,17	0,88	7574	3,58%
19,75	5ª Imagem	4491	758,04	0,17	0,88	7574	10,01%
67,75	6ª Imagem	3418	271,76	0,08	0,94	7574	3,59%
55,75	7ª Imagem	624	81,60	0,13	0,85	7574	1,08%
43,75	8ª Imagem	842	127,88	0,15	0,86	7574	1,69%
31,75	9ª Imagem	1216	200,43	0,16	0,83	7574	2,65%
19,75	10ª Imagem	1146	141,59	0,12	0,89	7574	1,87%
			Média	0,14		Soma	32,49%



Fonte: Autor (2014).

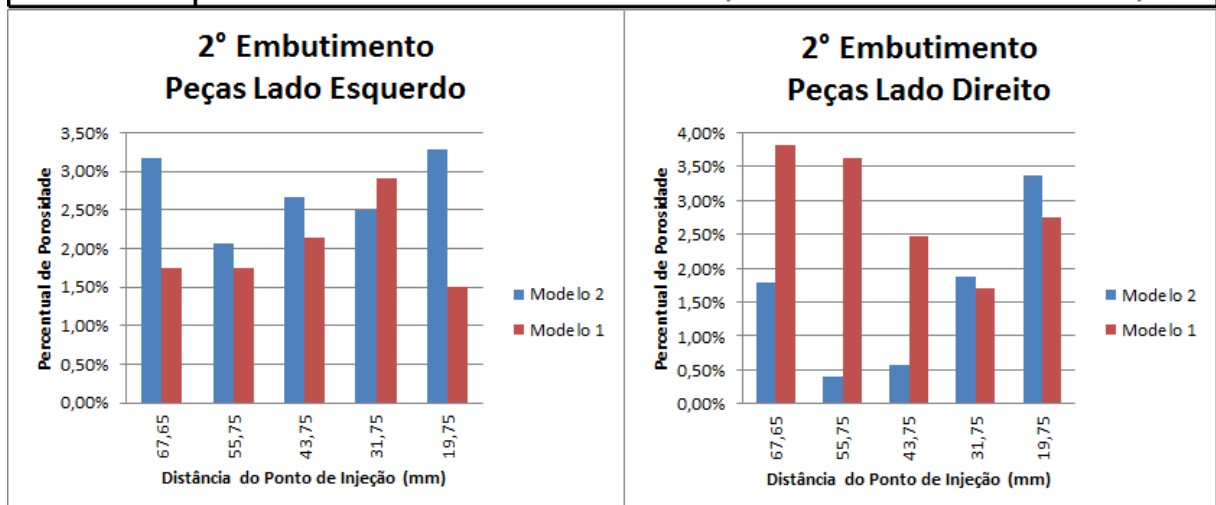
Distância do Ponto de Injeção (mm)		Quantidade	Área Total de Porosidade (mm ²)	Área Média de Porosidade (mm ²)	Circularidade (0-1)	Área Total	Área de Porosidade
1° Embutimento - Canal Novo							
2° Embutimento - Canal Novo							
63	1ª Imagem	325	65,11	0,20	0,87	6548	0,99%
52	2ª Imagem	417	48,16	0,12	0,83	7574	0,64%
40	3ª Imagem	980	123,78	0,13	0,94	7574	1,63%
28	4ª Imagem	651	84,14	0,13	0,93	7574	1,11%
16	5ª Imagem	983	173,42	0,18	0,87	7574	2,29%
			Média	0,15		Soma	6,67%
2° Embutimento - Canal Velho							
67,65	1ª Imagem	2479	220,78	0,09	0,87	7574	2,91%
55,75	2ª Imagem	1004	142,81	0,14	0,79	7574	1,89%
43,75	3ª Imagem	1010	131,16	0,13	0,79	7574	1,73%
31,75	4ª Imagem	430	55,32	0,13	0,79	7574	0,73%
19,75	5ª Imagem	766	106,89	0,14	0,76	7574	1,41%
			Média	0,13		Soma	8,67%

2° Embutimento - Canal



Fonte: Autor (2014).

Distância do Ponto de Injeção (mm)		Quantidade	Área Total de Porosidade (mm ²)	Área Média de Porosidade (mm ²)	Circularidade (0-1)	Área Total	Área de Porosidade
2° Embutimento - Peças Novo							
67,65	1ª Imagem	1873	239,43	0,13	0,92	7574	3,16%
55,75	2ª Imagem	1076	156,58	0,15	0,92	7574	2,07%
43,75	3ª Imagem	2295	202,52	0,09	0,89	7574	2,67%
31,75	4ª Imagem	1752	189,54	0,11	0,88	7574	2,50%
19,75	5ª Imagem	1669	249,33	0,15	0,94	7574	3,29%
67,65	6ª Imagem	1025	135,91	0,13	0,95	7574	1,79%
55,75	7ª Imagem	330	29,56	0,09	0,90	7574	0,39%
43,75	8ª Imagem	424	43,56	0,10	0,92	7574	0,58%
31,75	9ª Imagem	1303	141,33	0,11	0,92	7574	1,87%
19,75	10ª Imagem	2147	254,64	0,12	0,93	7574	3,36%
			Média	0,12		Soma	21,68%
2° Embutimento - Peças Velho							
67,65	1ª Imagem	1976	131,72	0,07	0,92	7574	1,74%
55,75	2ª Imagem	1166	132,61	0,11	0,82	7574	1,75%
43,75	3ª Imagem	1193	161,75	0,14	0,82	7574	2,14%
31,75	4ª Imagem	1518	220,88	0,15	0,81	7574	2,92%
19,75	5ª Imagem	1615	113,13	0,07	0,84	7574	1,49%
67,65	6ª Imagem	2732	288,46	0,11	0,91	7574	3,81%
55,75	7ª Imagem	2603	274,35	0,11	0,91	7574	3,62%
43,75	8ª Imagem	921	186,82	0,20	0,73	7574	2,47%
31,75	9ª Imagem	1404	129,50	0,09	0,88	7574	1,71%
19,75	10ª Imagem	3399	208,92	0,06	0,88	7574	2,76%
			Média	0,11		Soma	24,40%



Fonte: Autor (2014).