

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA**

MAYARA CAROLINE SILVA DE ANDRADE

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE INJEÇÃO SOBRE A  
POROSIDADE DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO INJETADA PELO PROCESSO  
HPDC

Lorena  
2019

MAYARA CAROLINE SILVA DE ANDRADE

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE INJEÇÃO SOBRE A  
POROSIDADE DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO INJETADA PELO PROCESSO  
HPDC

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Escola de Engenharia de Lorena – Universidade  
de São Paulo como requisito parcial para  
conclusão da Graduação do curso de Engenharia  
de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tadeu Fernandes Eleno

Lorena

2019

À minha família e meus amigos,  
a família que tive o privilégio de escolher.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao final do longo ciclo da graduação, sinto que tenho muito a agradecer.

Aos meus pais e irmãos, que nunca deixaram de me apoiar de todas as formas, mesmo nos momentos em que parecia que nada se havia a fazer.

Aos amigos que fiz em Lorena, sem os quais essa jornada certamente não teria sido tão avassaladora e incrível: Júlia, Anne, Jenifer, Laima, Guilherme, Gustavo, Élcio, Nataly, Mariana, Bárbara, Giulian, Rafael, Flávia, Érica, Nayara e todos os outros que fizeram parte da minha trajetória em algum momento, fazendo de mim quem sou hoje, e por isso não poderia ser mais grata.

À Escola de Engenharia de Lorena, por me proporcionar uma experiência de vida que eu jamais imaginaria viver ao me inscrever no vestibular.

A todos os meus professores, em particular ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Tadeu Fernandes Eleno, pela solicitude, confiança, amizade e aprendizado, e ao Prof. Dr. Miguel Justino Ribeiro Barboza, por todo o conhecimento transmitido em suas aulas - não apenas o acadêmico -, reavivando meu entusiasmo pela graduação.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, que me acolheu como estagiária e me proporcionou uma experiência maravilhosa: a de se trabalhar com o que se gosta, num ambiente agradável e com pessoas apaixonadas pelo que fazem. Em especial, agradeço ao meu orientador, Moyses Leite de Lima, pela dedicação na minha orientação, e aos amigos que fiz no IPT, especialmente ao Alexandre e ao Felipe, sempre presentes e dispostos a ajudar uma estagiária que ainda estava descobrindo o que fazer da vida.

Finalmente, a quaisquer que sejam as circunstâncias que me trouxeram ao lugar em que estou hoje, acompanhada das melhores pessoas que eu poderia esperar encontrar em meu caminho, que é o melhor que eu sequer poderia esperar, muito obrigada.

*“I'd take the awe of understanding over the  
awe of ignorance any day.”*

*Douglas Adams*

## RESUMO

A indústria da fundição está em constante busca de melhorias em seus processos, tornando-os cada vez mais dinâmicos e fabricando produtos cada vez mais livres de defeitos. Um dos processos mais utilizados na indústria, principalmente na indústria automotiva, é o processo de fundição de ligas de alumínio sob pressão, ou *High Pressure Die Casting* (HPDC). O HPDC é um processo adequado para altas produções, que produz peças com boas propriedades mecânicas, alta precisão e estabilidade dimensional, acabamento superficial que minimiza a necessidade de etapas de usinagem subsequentes, dentre outras qualidades que o tornam bastante atrativo para sua utilização na indústria. No entanto, as peças produzidas pela fundição sob pressão sofrem com um problema quase inevitável: o surgimento de porosidades e inclusões em suas estruturas, que degradam sua integridade estrutural, limitando sua utilização. Este trabalho buscou avaliar a influência de dois parâmetros chave para a formação de porosidades em peças fundidas da liga de alumínio, silício e cobre 380.0 pelo processo HPDC: a velocidade do pistão no segundo estágio da injeção e a pressão de intensificação. Foram realizados experimentos práticos e de simulação computacional de maneira a testar valores destas grandezas, e concluiu-se que a pressão de intensificação tem um papel fundamental, senão na extinção, ao menos na diminuição significativa da formação de porosidades numa peça injetada. Os resultados da velocidade do pistão no segundo estágio da injeção demonstraram que esta é uma variável bastante sensível, cuja influência nos valores de porosidade depende, também, de outras condições de fundição sob as quais a liga se encontra.

**PALAVRAS-CHAVE:** HPDC, Alumínio, Porosidade, Pressão de Intensificação, Velocidade do pistão, Liga 380.0.

## ABSTRACT

The foundry industry is in constant search of improvement in its processes, struggling to make them ever more dynamic and manufacturing defect-free products. Among these processes, the High Pressure Die Casting process (HPDC) is the most used by the automotive industry for the production of aluminum alloy castings. HPDC is better suited for high rates of production and produces castings with good mechanical properties, high dimensional stability and good surface finish, which minimizes the necessity of subsequential machining stages; these, amongst other qualities, make this process very attractive for the industry. However, the castings produced by this method suffer from an almost inevitable problem: the formation of porosities and inclusions, which degrade their structural integrity and limit their use. The present work aims to evaluate the influence of two key parameters in the formation of porosities in aluminum-copper-silicon alloy (380.0 alloy) castings: the plunger velocity at the second stage of injection and the intensification pressure. Computational simulations and casting experiments were performed to test these quantities. The results show that the intensification pressure has a major role in the minimization of the contents of porosity in the aluminum castings. The velocity of the plunger results show that this is a sensitive variable, whose influence on the porosity values of the casting depends heavily on other foundry parameters.

**KEY WORDS:** HPDC, Aluminum, Porosity, Intensification Pressure, Plunger velocity, Alloy 380.0.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração esquemática de uma máquina de injeção a quente.....	16
Figura 2 - Ilustração esquemática de uma máquina de injeção a frio.....	16
Figura 3 - Caixa de transmissão fundida sob pressão a partir da liga 380.0.....	19
Figura 4 - Fenômenos superficiais causados pela turbulência do líquido na câmara de injeção.....	21
Figura 5 - Percentual de porosidade de uma peça injetada no processo HPDC versus Pressão de Intensificação.....	22
Figura 6 - Efeitos de diferentes valores de Pressão de Intensificação na porosidade de peças fundidas.....	22
Figura 7 - Representação esquemática da formação da maioria dos defeitos de laminação em peças fundidas.....	24
Figura 8 - Porosidade gasosa típica.....	25
Figura 9 - Solubilidade do hidrogênio no alumínio a 1 atm.....	26
Figura 10 - Eixo térmico neutro de uma peça (representado pela linha pontilhada) e provável localização das porosidades de contração.....	28
Figura 11 - Modelo da peça injetada simulado no software MAGMASOFT®.....	32
Figura 12 - Injetora utilizada na injeção das peças produzidas.....	34
Figura 13 - Microscópio utilizado na análise das peças injetadas.....	34
Figura 14 - Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 0,5 m/s sem pressão de intensificação.....	36
Figura 15 - Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 2 m/s sem pressão de intensificação.....	37
Figura 16 - Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 2 m/s sem pressão de intensificação.....	37
Figura 17 - Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 0,5 m/s, com pressão de intensificação no valor de 400 bar (40 MPa).....	38
Figura 18 - Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 4 m/s com pressão de intensificação no valor de 400 bar (40 MPa).....	39
Figura 19 - Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 0,5 m/s com pressão de intensificação no valor de 600 bar (60 MPa).....	39
Figura 20 - Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 4 m/s com pressão de intensificação no valor de 600 bar (60 MPa).....	40

Figura 21 - Configuração das peças fundidas em bruto.....	41
Figura 22- Amostras produzidas sob as condições de velocidade de pistão de 0,5 m/s, sem pressão de intensificação.....	42
Figura 23 - Amostras produzidas sob as condições de velocidade de pistão de 2 m/s, sem pressão de intensificação.....	42
Figura 24 - Amostras produzidas sob as condições de velocidade de pistão de 0,5 m/s, com pressão de intensificação de 500 bar.....	43
Figura 25 - Amostras produzidas sob as condições de velocidade de pistão de 2 m/s, com pressão de intensificação de 600 bar.....	43
Figura 26 - Visão superior de uma das faces das amostras retiradas da peça fundida a 0,5 m/s sem pressão de intensificação.....	45
Figura 27 - Detalhe de uma porosidade de contração presente na amostra fundida a 0,5 m/s sem pressão de intensificação.....	45
Figura 28 - Detalhe de uma porosidade de contração presente na amostra fundida a 0,5 m/s sem pressão de intensificação.....	46
Figura 29 - Detalhe de uma porosidade mista de origem gasosa e de contração presente na amostra fundida a 0,5 m/s sem pressão de intensificação.....	46
Figura 30 - Visão superior de uma das faces das amostras retiradas da peça fundida a 0,5 m/s com pressão de intensificação no valor de 500 bar.....	47
Figura 31 - Detalhe da presença de porosidade de contração e microporosidades de hidrogênio na peça fundida a 0,5 m/s com IP de 500 bar.....	48
Figura 32 - Detalhe da presença de porosidade de contração e poros de origem gasosa na peça fundida a 0,5 m/s com IP de 500 bar.....	48
Figura 33 - Detalhe da presença de porosidades de origem gasosa interligados por uma trinca na peça fundida a 0,5 m/s com IP de 500 bar.....	49
Figura 34 - Sequência de imagens que representa a continuidade de uma porosidade de gás encontrada na peça fundida a 2 m/s, sem pressão de intensificação.....	50
Figura 35 - Visão superior de uma das faces das amostras retiradas da peça fundida a 2 m/s com pressão de intensificação no valor de 600 bar.....	51
Figura 36 - Visão superior de uma das faces das amostras retiradas da peça fundida a 2 m/s com pressão de intensificação no valor de 600 bar.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das etapas do processo HPDC.....	17
Tabela 2 - Composições nominais e limites de composição das ligas de alumínio 380.0 e A380.0.....	18

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
2. Objetivos.....	14
3. Revisão bibliográfica.....	15
3.1 O processo de fundição sob pressão (HPDC).....	15
3.2 Principais ligas de alumínio utilizadas no processo HPDC .....	17
3.3 Principais variáveis do processo HPDC .....	20
3.4 Principais defeitos em peças obtidas no processo HPDC.....	23
3.4.1 Juntas frias ( <i>cold flows</i> ).....	23
3.4.2 Porosidade .....	24
3.4.3 Inclusões.....	29
3.4.4 Efeitos combinados de Hidrogênio, Contração e Inclusões .....	30
4. Metodologia .....	32
4.1 Modelagem matemática .....	32
4.2 Experimentos .....	33
4.2.1 Equipamentos .....	33
4.2.2 Procedimento experimental .....	34
4.2.3 Análise metalográfica .....	35
5. Resultados e discussão .....	36
5.1 Modelagem matemática do processo HPDC - Magmasoft.....	36
5.1.1 Efeito da velocidade do pistão .....	36
5.1.2 Efeito da pressão de intensificação.....	38
5.2 Experimentos .....	40
5.2.1 Observações gerais .....	41
5.2.2 Análise metalográfica .....	44
6. Conclusões.....	0
7. Referências bibliográficas.....	2



## 1. Introdução

Dentre os diversos processos de obtenção de peças fundidas de alumínio, destaca-se o HPDC (*High Pressure Die Casting*), técnica que utiliza-se de pressão elevada como meio de ajustar o metal ao molde a fim de eliminar possíveis defeitos provenientes do processo de produção.

O processo de fundição sob pressão caracteriza-se, em linhas gerais, pela alta produtividade – o que leva a uma redução de custos -, ciclos de produção rápidos, peças finais com alta precisão, estabilidade dimensional e excelente acabamento superficial – reduzindo a necessidade de posterior usinagem das mesmas -, e a utilização de moldes metálicos que possuem uma vida útil relativamente longa. Estes fatores levam a um elevado custo de capital e desenvolvimento, o que torna o HPDC um processo adequado e economicamente viável para grandes produções de peças fundidas.

As peças produzidas através do HPDC, ainda que caracterizadas por uma qualidade excelente, são também, como em qualquer outro processo de produção, passíveis de defeitos, destacando-se a presença de filmes óxidos e porosidades. Considerando-se que sua utilização dá-se, majoritariamente, na produção de peças utilizadas na montagem de automóveis e outros veículos, é imprescindível a busca pela qualidade, de modo que estes defeitos não ponham em risco a vida daqueles que utilizarem o meio de transporte composto por essas peças. Os defeitos nos produtos finais do HPDC são, então, limitantes na aplicação do processo para a obtenção de componentes que requeiram alta confiabilidade, como exposto.

O HPDC possui um grande número de variáveis de processo, variáveis estas que interagem entre si durante todo o ciclo de produção, o que torna sua análise e eventuais pesquisas que busquem a diminuição de defeitos nos produtos finais através do isolamento de variáveis procedimentos deveras complexos de se realizar.

## **2. Objetivos**

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito de duas variáveis do processo de fundição sob pressão na formação de defeitos de uma peça composta pela liga de alumínio comercial A380. As variáveis estudadas serão a velocidade do pistão no segundo estágio e pressão de intensificação.

### 3. Revisão bibliográfica

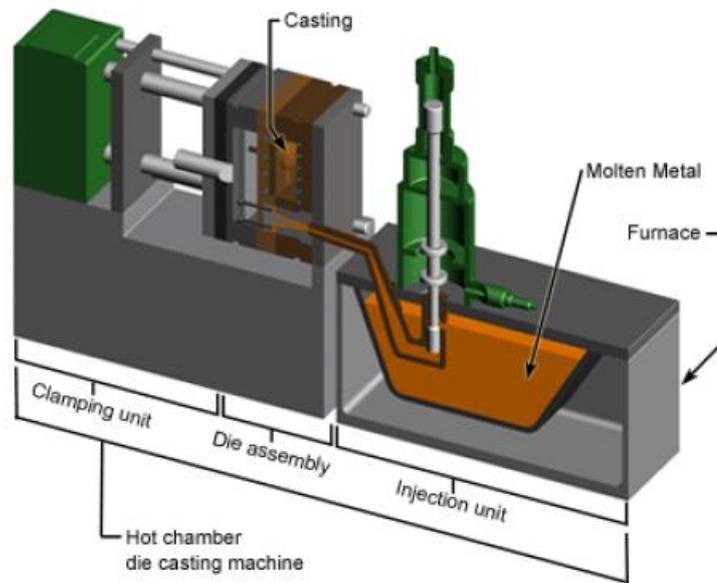
#### 3.1 O processo de fundição sob pressão (HPDC)

Atualmente, a produção de peças fundidas para a indústria é realizada através de diversos processos, como a fundição por cera perdida, por centrifugação, areia, gravidade e afins. No caso da produção de peças fundidas de alumínio, no entanto, o processo de fundição sob pressão (*High Pressure Die Casting*, ou HPDC) excede a produção de peças obtidas pelos processos citados (KAUFMAN et al., 2004).

Esta preferência pelo HPDC sobre os outros processos de fundição se deve a diversos fatores: é um processo que possui ciclos de produção rápidos, alta produtividade, produz peças com alta precisão e estabilidade dimensional que podem possuir geometrias complexas e espessuras finas. Além disso, os produtos possuem excelente acabamento superficial, o que, juntamente aos fatores anteriormente citados, reduz a necessidade de usinagem da peça, sendo a usinagem um processo posterior geralmente necessário e custoso para os componentes fabricados a partir de outros processos de produção. Os moldes metálicos utilizados nas injetoras possuem uma vida útil relativamente longa, o que faz deste um processo economicamente viável para grandes volumes de produção.

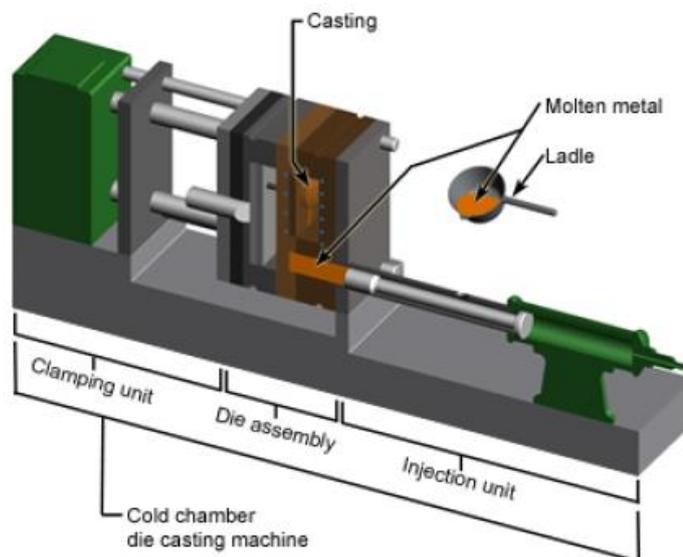
O processo HPDC pode ocorrer através de dois meios: pela operação em câmara quente ou câmara fria. No processo de câmara quente (Figura 1), o forno de espera está embutido na injetora. Metais de baixo ponto de fusão, que não atacam de maneira agressiva o interior da câmara de injeção, como zinco, estanho e chumbo, são fundidos por este método. No processo de câmara fria (Figura 2), o forno de espera é separado da injetora, não estando em contato contínuo com o material fundido, o que permite a fundição de ligas com maiores pontos de fusão, como o alumínio, o magnésio e o cobre.

Figura 1 – Ilustração esquemática de uma máquina de injeção a quente.



Fonte: RAHIMI (2008).

Figura 2 – Ilustração esquemática de uma máquina de injeção a frio.



Fonte: RAHIMI (2008).

No processo de injeção sob pressão em câmara fria, o metal fundido é transportado do tanque de contenção para a bucha de injeção por meio de uma panela ou um bico dosador. O metal é, então, injetado em moldes refrigerados e lubrificadas através da ação de um pistão hidráulico, enchendo a cavidade do molde. A pressão exercida pelo sistema de injeção é mantida sobre a peça até

que a mesma se solidifique. Os moldes são comumente usinados a partir de aços ferramenta de alta qualidade. (KAUFMAN et al., 2004)

Segundo o manual da injetora FRECH QC 210, o processo de injeção sob pressão divide-se em 3 etapas básicas, como segue:

Tabela 1 – Descrição das etapas do processo HPDC

1ª etapa	Início do processo. O pistão empurra o metal líquido a baixa velocidade através da bucha de injeção para a entrada do molde.
2ª etapa	O molde é enchido à velocidade da segunda fase, sendo esta maior que a da primeira fase.
3ª etapa	Na terceira etapa, há a recompressão da peça injetada. O valor da pressão de intensificação depende da peça a ser fundida.

Fonte: Frech (2013).

O tempo total de cada ciclo de produção das peças injetadas é de, aproximadamente, 25 segundos (NORWOOD, 2007).

O transporte do metal fundido a partir da câmara de injeção para o molde é realizado através de canais de ataque e de alimentação. A realização cuidadosa do projeto destes canais é essencial na qualidade final das peças produzidas, posto que, dependendo do projeto destes sistemas, a ocorrência de turbulências, aprisionamento de ar e descontinuidade do fluxo de metal pelo molde podem ser minimizadas ou acentuadas.

O processo HPDC é adequado para a produção de grandes quantidades de peças, com alta integridade estrutural e sanidade interna. A indústria automotiva faz uso deste processo para a produção de estruturas de alta qualidade, que possuem alta resistência mecânica, ductilidade e tenacidade (KAUFMAN et al., 2004).

### **3.2 Principais ligas de alumínio utilizadas no processo HPDC**

Devido à qualidade esperada de seus produtos finais, o processo HPDC exige a utilização de ligas com propriedades bastante superiores às daquelas utilizadas nos processos de fundição convencionais. As contrações que a peça

sofre na solidificação fazem com que uma boa fundibilidade (*castability*) seja um grande requisito que se espera destas ligas. O conceito de fundibilidade não é precisamente definido, mas diz-se de fundível aquela liga que tem maior facilidade para ser moldada na forma de uma peça fundida de alta qualidade. Uma peça fundível requer menores custos de ferramental, baixa energia para ser produzida e sua fundibilidade é influenciada por fatores como a temperatura de vazamento, fluidez, contração de solidificação e sua tendência à formação de escória (RAVI, 2006).

As ligas mais comumente utilizadas são as da família das ligas de Alumínio-Silício. Dentre elas, a liga 380.0 e suas variações abrangem cerca de 85% da produção total de peças fundidas sob pressão. Suas propriedades incluem boa resistência mecânica, dureza e resistência à corrosão na condição de fundido em bruto, excelente fluidez e resistência à propagação de trincas a quente, aliadas a um baixo custo (KAUFMAN et al., 2004).

Tabela 2 – Composições nominais e limites de composição das ligas de alumínio 380.0 e A380.0

Alloy	Type(a)	Composition, wt%										Others		
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Sn	Each(b)	Total(b)	Al
380.0	Nominal	8.5	...	3.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	7.5–9.5	2.0	3.0–4.0	0.50	0.10	...	0.50	3.0	...	0.35	...	0.50	bal
A380.0	Nominal	8.5	...	3.5	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	Limits	7.5–9.5	1.3	3.0–4.0	0.50	0.10	...	0.50	3.0	...	0.35	...	0.50	bal

Fonte: Adaptado de KAUFMAN et al., 2004

A liga 380.0 se enquadra na família das ligas de Alumínio-Silício-Cobre, sendo que a adição do cobre contribui para o aumento da resistência mecânica da peça e sua usinabilidade, enquanto que o acréscimo do silício reduz a fragilidade a quente e melhora a fundibilidade da peça.

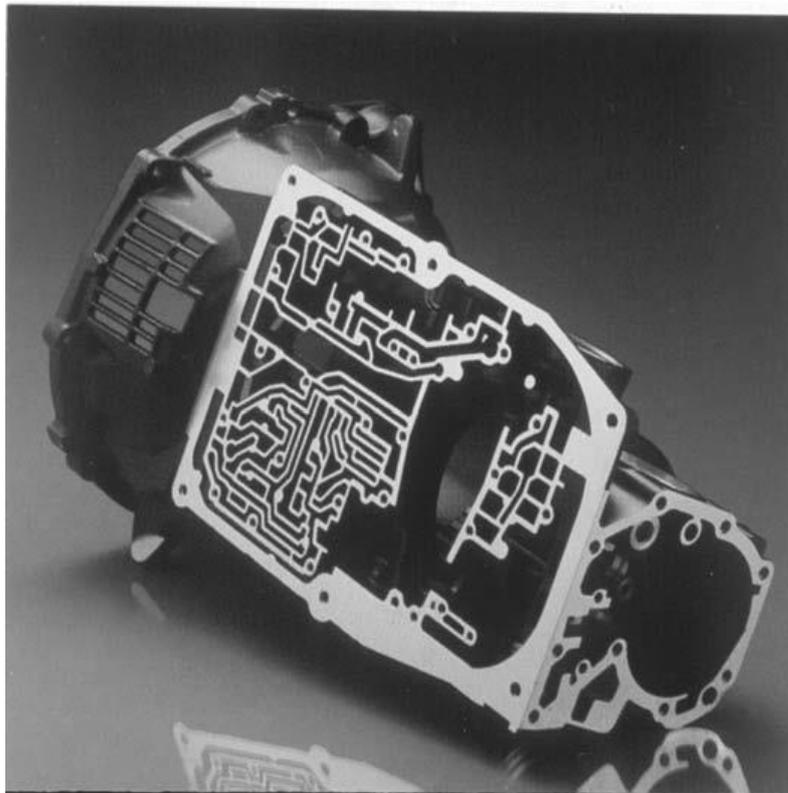
Quanto às suas aplicações, a liga 380.0 classifica-se como uma “liga de aplicação geral” (KAUFMAN et al., 2004). Devido a suas características superiores de fundição, ligas que têm o silício como maior constituinte de liga são aquelas de maior importância comercial. A 380.0 apresenta boas características de fundição, maior resistência mecânica e dureza e melhor usinabilidade, com baixas ductilidade e resistência à corrosão. Ela e outras ligas de aplicação geral

semelhantes (como as ligas 308.0, 319.0, 360.0 e afins) são frequentemente produzidas na condição de fundido em bruto (KAUFMAN et al., 2004).

Aplicações típicas dessas ligas incluem:

- Maquinário;
- Caixas de transmissão (Figura 3);
- Blocos de motor;
- Medidores de gás e reguladores;
- Caixas de engrenagem;
- Rotores;
- Coletores de admissão;
- Cabeçotes de motor;
- Alojamento de embreagens;
- Bombas de combustível;
- Cásteres de óleo;
- Partes de motores e alojamentos.

Figura 3 – Caixa de transmissão fundida sob pressão a partir da liga 380.0



Fonte: KAUFMAN et al. (2004)

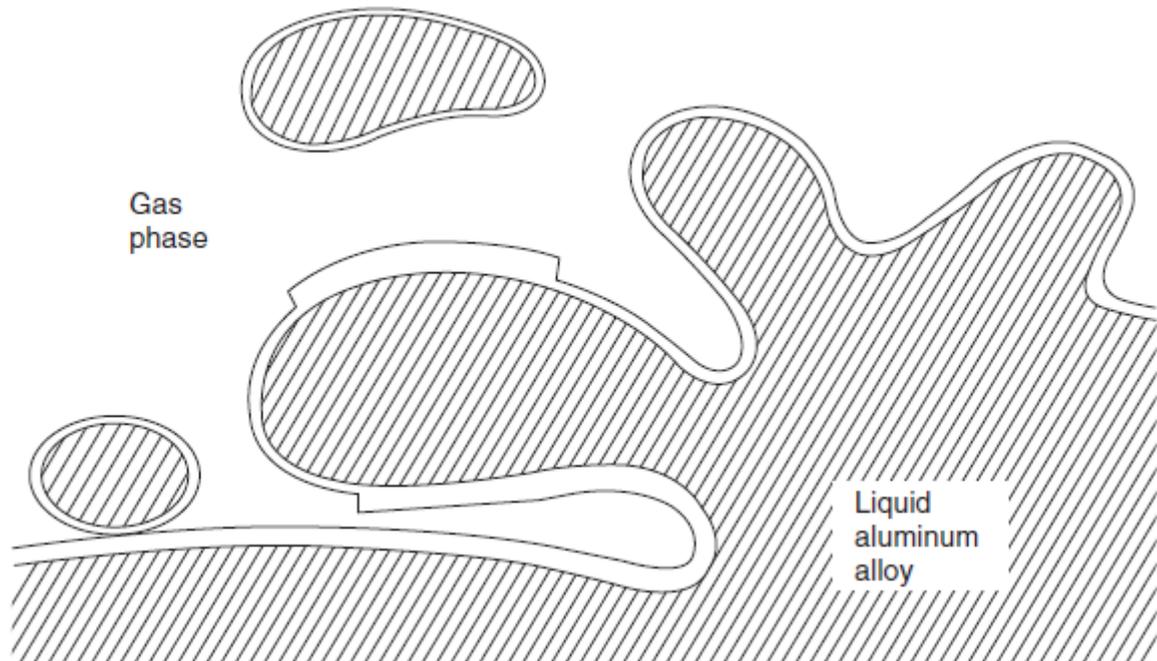
### 3.3 Principais variáveis do processo HPDC

Durante todas as etapas do processo HPDC, existem inúmeras variáveis de processo que podem alterar a qualidade das peças finais e às quais devemos dar atenção. A quantidade de lubrificante aplicada no molde, a velocidade de despejo do metal fundido na bucha de injeção, a quantidade de metal despejada, a temperatura do líquido durante a injeção, a temperatura do molde, sua geometria, a duração das etapas, entre diversos outros, são fatores que podem prejudicar ou melhorar a qualidade dos produtos manufaturados na fundição sob pressão.

No entanto, algumas variáveis possuem um peso maior no resultado do processo quando se trata da porosidade das peças finais obtidas, Segundo Tsoukalas, as variáveis que mais influenciam os teores de porosidade das peças fundidas por HPDC são, respectivamente, a pressão de intensificação no terceiro estágio, a velocidade do pistão no segundo estágio e o tempo de enchimento do molde (TSOUKALAS, 2003).

A velocidade do pistão no segundo estágio relaciona-se ao sistema de canais de alimentação/canais de ataque da peça, ao tamanho destes e ao perfil geométrico da cavidade do molde. Um baixo valor de velocidade pode levar à solidificação prematura das ligas nos canais de ataque, o que diminui a área de entrada efetiva de líquido no molde, enquanto que, se muito elevado, pode levar à corrosão do molde. Os moldes utilizados nas injetoras de HPDC são fabricados a partir de aços ferramenta de veras custosos, então é de grande interesse do produtor a conservação destes moldes pelo maior tempo possível. As propriedades mecânicas, como o limite de resistência à tração e a alongação, aumentam com o aumento da velocidade. Isso se deve à formação de bolhas de gás menores e mais homoganeamente dispersas pela peça quando o líquido atravessa o molde. No entanto, um aumento na velocidade também representa um aumento na turbulência com a qual o metal fundido caminhará pelo molde, o que pode levar a um aumento na formação de porosidades na peça injetada (Figura 4).

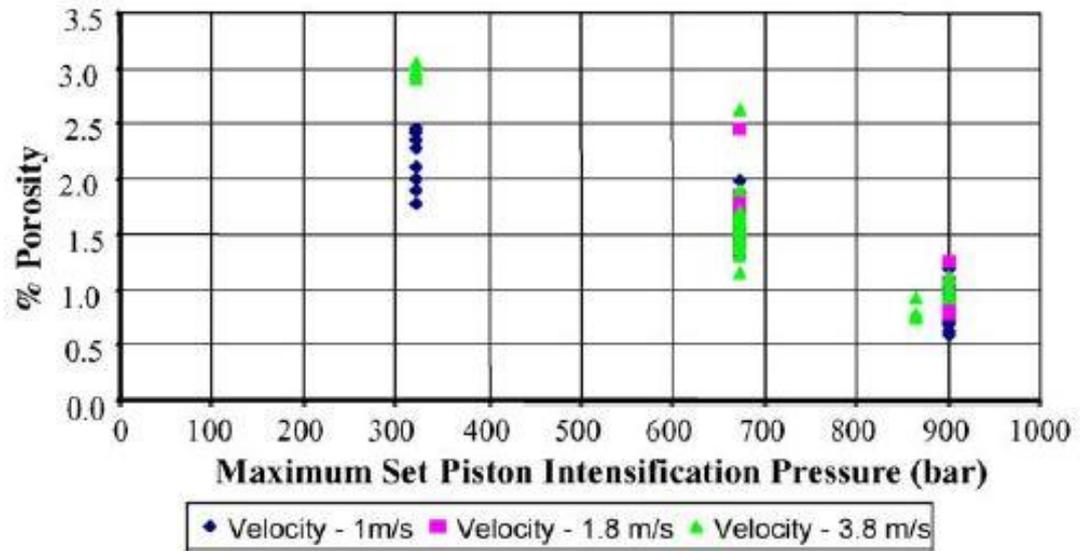
Figura 4 – Fenômenos superficiais causados pela turbulência do líquido na câmara de injeção



Fonte: CAMPBELL (2011).

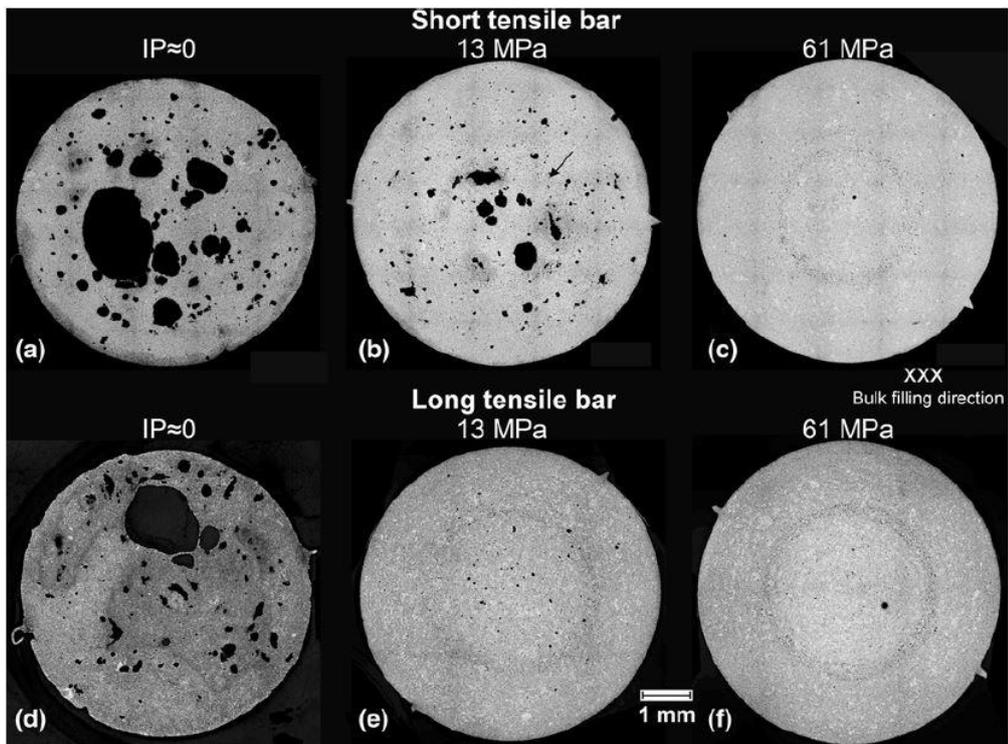
A chamada pressão de intensificação (IP) é uma pressão aplicada no terceiro estágio do processo HPDC, que tem como objetivo o fechamento das bolhas de ar aprisionado e a alimentação das contrações de solidificação, impelindo as bolhas formadas na peça para bolsas de líquido externas à mesma. Em geral, um maior valor da pressão de intensificação gera uma diminuição na quantidade de porosidade da peça (Figuras 5 e 6), refina sua microestrutura e melhora os valores de dureza e resistência à tração (ADAMANE et al., 2015; DARGUSCH et al., 2006; OUTMANI et al., 2017).

Figura 5 – Percentual de porosidade de uma peça injetada no processo HPDC versus Pressão de Intensificação



Fonte: DARGUSCH et al. (2006)

Figura 6 – Efeitos de diferentes valores de Pressão de Intensificação na porosidade de peças fundidas



Fonte: OTARAWANNA et al. (2009)

### **3.4 Principais defeitos em peças obtidas no processo HPDC**

O potencial para o surgimento de defeitos nas peças injetadas pelo processo HPDC é alto, afinal os moldes são preenchidos a altas velocidades, a geometria das peças pode ser complexa e com paredes finas, as taxas de transferência de calor são altas, além de múltiplos outros fatores. A interação entre as diversas variáveis do processo podem gerar descontinuidades na peça, e deve-se atentar para o fato de que, na tentativa de solucionar um defeito específico relacionado a uma das variáveis, outros defeitos adversos podem ser gerados neste processo.

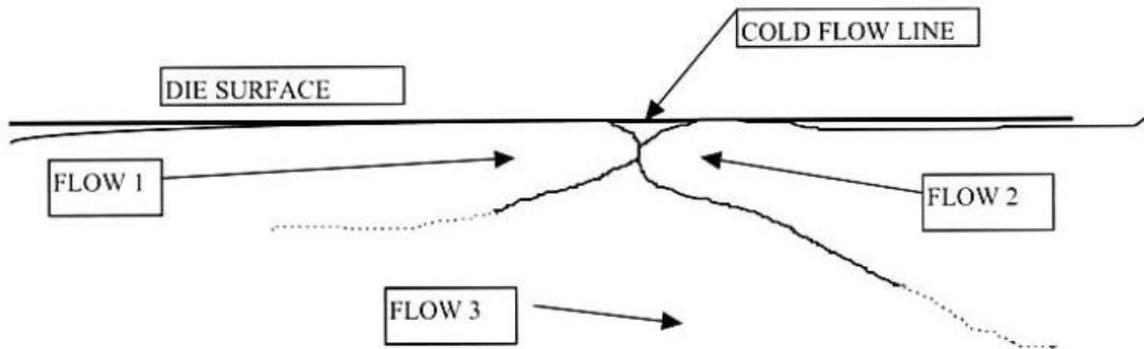
Dentre os defeitos típicos gerados nas peças fundidas sob pressão, podemos citar a presença de laminações, bolhas, inclusões, trincas, rebarbas, e diversos outros. Neste trabalho, serão enfatizados os seguintes defeitos e suas soluções sugeridas:

- Juntas frias;
- Porosidades de hidrogênio e gás;
- Porosidades de contração;
- Inclusões de óxidos.

#### **3.4.1 Juntas frias (*cold flows*)**

Juntas frias são defeitos pertencentes à classe das laminações, ou seja, a formação de camadas de metal solidificado na peça fundida, formando um sólido não-homogêneo. As laminações ocorrem quando uma camada de metal semi-sólido vai de encontro a outra camada de metal na mesma condição; estas camadas de metais se juntam numa configuração não estável, em que, ainda que formem um conjunto sólido, quando aplicada pressão sobre a junta, ainda que mínima, pode ocorrer a separação das camadas e a conseqüente descontinuidade da peça fundida (WALKINGTON & MURRAY, 2003). A figura 7 demonstra este fenômeno.

Figura 7 – Representação esquemática da formação da maioria dos defeitos de laminação em peças fundidas



Fonte: WALKINGTON & MURRAY (2003).

Dentre as causas da formação de juntas frias, podemos citar o tempo de enchimento do molde, sua temperatura, o projeto dos canais de alimentação e a temperatura do metal fundido. Algumas maneiras de prevenir a ocorrência de laminações incluem a diminuição no tempo de enchimento, o aumento das temperaturas do molde e do fundido (de maneira que as frentes do metal não estejam no estado semi sólido ao se encontrarem), e uma possível mudança no projeto do sistema de canais, que torne mais eficiente o transporte do metal líquido da bucha de injeção até a última região da peça a ser injetada.

### 3.4.2 Porosidade

A porosidade é um dos maiores problemas enfrentados pelos fabricantes de peças fundidas sob pressão. Ela reduz a área efetiva das peças devido ao aumento da fração volumétrica dos poros, causando impacto nas propriedades mecânicas pela concentração de tensão nos vazios formados, o que leva à ocorrência de fraturas prematuras dos produtos (KAUFMAN et al., 2004; WALKINGTON & MURRAY, 2003).

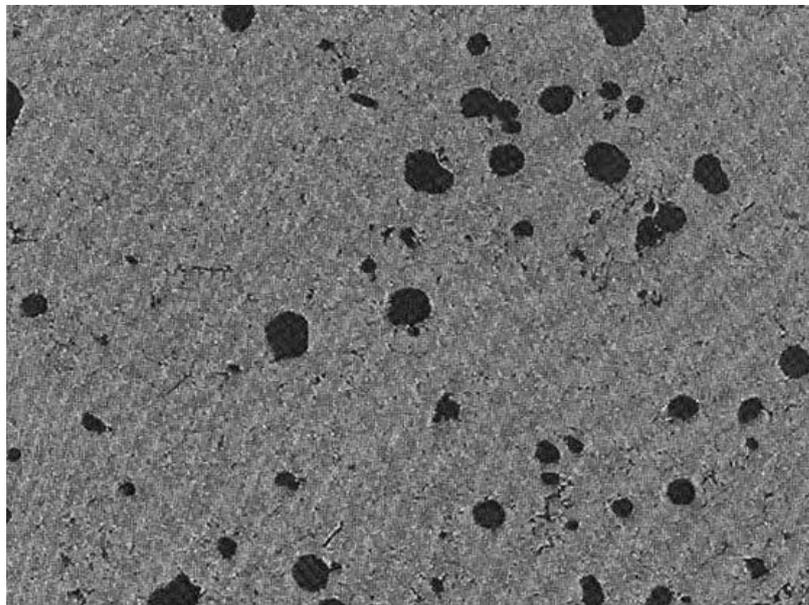
Os principais tipos de porosidade que tendem a ocorrer nas peças são as porosidades devido à contração que a peça sofre durante a solidificação, porosidades de gás e, particularmente nesta categoria, porosidades devido à entrada de hidrogênio nas peças injetadas.

### 3.4.2.1 Porosidades de gás

As porosidades gasosas são produto, primariamente, das altas velocidades de injeção utilizadas na produção de peças injetadas sob pressão. Altas velocidades levam à turbulência no transporte do metal líquido pelo molde, o que resulta no aprisionamento de bolhas de gases ao longo da peça.

As porosidades gasosas são caracterizadas por seu formato arredondado e superfícies lisas.

Figura 8 – Porosidade gasosa típica



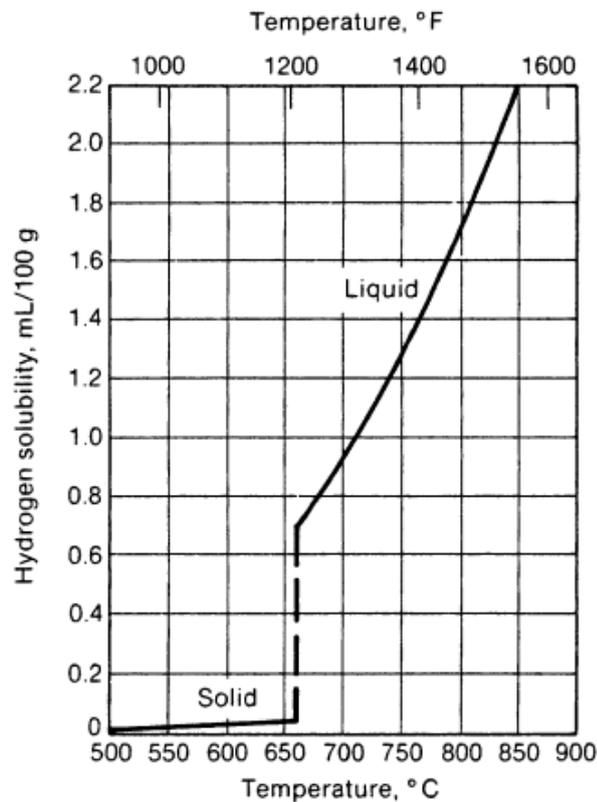
Fonte: WALKINGTON (2006).

Algumas maneiras de prevenir o aparecimento de bolhas de gás nas peças fundidas é a utilização de sistemas de vácuo no processo, a especificação de uma velocidade do pistão adequada para aquela configuração geométrica de canais e molde e o uso de ferramentas de simulação gráfica que demonstrem as prováveis fontes de porosidade e as regiões em que elas provavelmente se localizarão, o que permite a prevenção de defeitos sem o custo da manufatura e análise das peças prontas para que haja a constatação dos mesmos.

### 3.4.2.2 Porosidade de hidrogênio

O hidrogênio é o único gás solúvel de maneira apreciável no alumínio e em suas ligas. Sua solubilidade aumenta rapidamente com o aumento da temperatura sobre a linha liquidus e é consideravelmente maior no estado líquido que no estado sólido (figura 9).

Figura 9 – Solubilidade do hidrogênio no alumínio a 1 atm



Fonte: KAUFMAN (2004).

Durante o resfriamento e a solidificação, pode ocorrer a precipitação do hidrogênio dissolvido em excesso com baixa solubilidade no sólido na sua forma molecular, resultando na formação de vazios primários e/ou secundários. Porosidades primárias, ou interdendríticas, se formam quando os teores de hidrogênio são suficientemente altos, de maneira que o hidrogênio seja rejeitado na frente de solidificação, resultando numa saturação supercrítica e formação de bolhas. A porosidade secundária (escala micrométrica) ocorre quando os teores

de hidrogênio dissolvido são baixos e a formação de vazios ocorre em concentrações de hidrogênio subcríticas características (KAUFMAN et al., 2004).

As porosidades de hidrogênio caracterizam-se pela distribuição generalizada de vazios através da estrutura da peça.

É importante fazer-se notar que porosidades de hidrogênio distribuídas finamente pela peça nem sempre são indesejáveis; sua precipitação pode alterar a forma e a distribuição das porosidades provenientes da contração de solidificação, defeito este geralmente mais danoso às propriedades das peças fundidas (KAUFMAN et al., 2004).

A contaminação por hidrogênio pode ocorrer de diversas formas, incluindo a utilização de refratários não completamente secos, no transporte do forno de espera para a bucha de injeção, no próprio forno de espera, e através da atmosfera do ambiente da injetora.

A turbulência, seja no tratamento do fundido ou no derramamento na bucha de injeção, pode acelerar a taxa de absorção do hidrogênio proveniente da umidade atmosférica. A umidade presente no ferramental, lingotes, sucata, refinadores de grão e ligas mãe que possam ser adicionados ao conjunto a ser fundido afeta o teor de hidrogênio dissolvido na liga, podendo ultrapassar o limite de solubilidade aceitável para que não haja contaminação.

A principal maneira de evitar a contaminação por hidrogênio da liga e evitar a formação deste tipo de porosidade é a desgaseificação. Este processo consiste no borbulhamento de gases inertes ou quase inertes (geralmente argônio e nitrogênio, respectivamente) no alumínio líquido. O hidrogênio adere (“molha”) às bolhas de gás e é arrastado através do fluxo de ar e removido. Esta operação também auxilia na flotação do óxido de alumínio, resultante da exposição do metal ao ar, permitindo a produção de peças fundidas de qualidade aceitável a partir de metais com altos teores de hidrogênio.

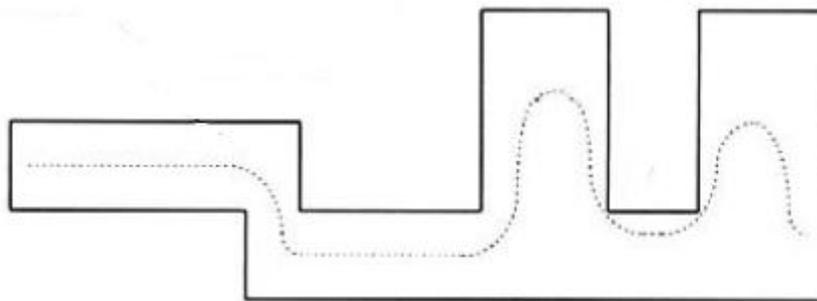
### **3.4.2.3 Porosidade de contração**

A mudança de fase do estado líquido para o estado sólido, na maioria dos metais, é acompanhada de uma mudança no volume. Em ligas de alumínio, esta mudança é representada por uma contração volumétrica que varia de 3,5 a 8,5%.

Isto resulta no surgimento de poros de contração, que se relaciona tanto à mudança de estado quanto ao intervalo de solidificação da liga injetada (KAUFMAN et al., 2004; WALKINGTON & MURRAY, 2003).

As porosidades de contração sempre ocorrem na última região da peça a se solidificar, a qual, em peças cuja distribuição de temperatura é homogênea, será no eixo neutro térmico da peça (Figura 10) (WALKINGTON & MURRAY, 2003).

Figura 10 – Eixo térmico neutro de uma peça (representado pela linha pontilhada) e provável localização das porosidades de contração.



Fonte: Adaptado de WALKINGTON & MURRAY (2003).

A aparência característica das porosidades de contração é a de poros irregulares e grosseiros (no entanto, existem exceções). Sua aparência se deve à maneira que a peça se solidifica, e aparece em ligas cuja estrutura é, em sua maioria, dendrítica. A taxa de crescimento das dendritas é baixa quando comparada à taxa de solidificação das peças fundidas e, por sua morfologia ter o formato aproximado de árvores, na etapa final da solidificação, os braços dendríticos serão os últimos a se solidificarem; este fator, juntamente à contração advinda da transformação líquido-sólido, resulta na formação de vazios não preenchidos em formatos irregulares – os vazios que existem entre os braços dendríticos (WALKINGTON & MURRAY, 2003).

Dentre as maneiras de evitar, ou ao menos diminuir a ocorrência de poros de contração, existe o controle da temperatura do molde: ela não reduz, necessariamente, a quantidade de vazios, mas espalha-os pela peça, evitando sua concentração numa determinada região. Além disso, a manutenção de um

valor de pressão de intensificação adequado pode minimizar os efeitos da contração de solidificação (WALKINGTON, 2006).

### 3.4.3 Inclusões

As inclusões são uma grande preocupação na fundição de alumínio. Geralmente, as inclusões acontecem na forma do óxido de alumínio, ou alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). O alumínio é altamente reativo com o oxigênio e, em contato com o ar, rapidamente forma uma camada de óxido protetiva sobre o alumínio puro.

A formação da alumina pode ocorrer em diversos estágios da injeção: qualquer turbulência que o alumínio sofrer no banho traz à superfície metal fundido puro, que oxida; o transporte do banho para a bucha de injeção, quando em contato com o ar, oxida o metal; o vazamento na bucha de injeção gera turbulências que também levam à formação da camada óxida na superfície do metal fundido, entre diversas outras situações. O alumínio também é quimicamente agressivo, e pode reagir com compostos refratários ou com os revestimentos usados para proteger cadinhos, painéis e ferramentas, o que resulta no aprisionamento de partículas não-metálicas (KAUFMAN et al., 2004; WALKINGTON & MURRAY, 2003).

Inclusões, assim como as porosidades de contração e de hidrogênio, reduzem os valores das propriedades por diminuir a área efetiva da seção transversal quando uma tensão é aplicada e pela concentração de tensões na interface das inclusões (KAUFMAN et al., 2004).

As inclusões possuem diversas formas e tamanhos: óxidos de alumínio possuem formas cristalográficas ou amorfas diferentes na forma de filmes, flocos e partículas aglomeradas; o óxido de magnésio possui o formato típico de particulado fino e espinélio podem ser pequenos nódulos duros ou possuírem formas grandes e complexas, por exemplo (KAUFMAN et al., 2004).

A prevenção de inclusões constitui, principalmente, de ações que previnam ou minimizem a oxidação do alumínio, evitem o aprisionamento de óxidos e removam aqueles eventualmente formados através de reações de escorificação ou filtração.

Uma temperatura mais alta que a necessária para o processo de fundição estimula a formação de óxidos, então deve-se definir um valor de temperatura adequado para a injeção.

A desgaseificação que utiliza gases inertes (argônio) ou quase-inertes (nitrogênio) são parcialmente efetivos na remoção de matéria inclusa, sendo mais apropriada para a remoção do hidrogênio. No entanto, o uso de desgaseificação rotativa melhora a eficiência da remoção de inclusões, ainda que a utilização de gases de escorificação ativos, como cloro ou outros halogênios seja necessária para “desmolhar” inclusões de óxidos; isto facilita sua separação pela ação varredora do gás escorificante. O uso de escorificantes sólidos apropriados também é eficaz (KAUFMAN et al., 2004).

#### **3.4.4 Efeitos combinados de Hidrogênio, Contração e Inclusões**

Em diversas situações, as porosidades de contração, de gás aprisionado e de hidrogênio se fazem presentes numa mesma peça fundida, geralmente acompanhadas dos óxidos que tendem a se formar no processo de injeção, e deve-se prestar atenção na interação aditiva de seus efeitos: pequenas quantidades de hidrogênio dissolvido aumentam significativamente o tamanho dos poros quando há a formação de poros de contração; porosidades de hidrogênio podem se conformar em regiões de braços dendríticos, que dão às bolhas a aparência característica de um poro de contração; o rechupe que ocorre a gradientes muito baixos pode assumir a aparência de paredes lisas, e não rugosas, dentre outras combinações, que contradizem a teoria. Separar categoricamente os efeitos destes defeitos sobre as peças produzidas é uma tarefa praticamente impossível. Isso se comprova, por exemplo, se considerarmos que a formação de vazios de hidrogênio e os efeitos do hidrogênio na contração interna são influenciados por inclusões aprisionadas que facilitam a nucleação de precipitados; devido ao fato de as inclusões facilitarem a formação de bolhas, até mesmo a baixos níveis de hidrogênio dissolvido, é importante considerar sua interação ao invés de tentar correlacionar o teor de hidrogênio absoluto com a formação de defeitos (KAUFMAN et al., 2004).

A presença de vazios internos piora as propriedades das peças: quanto maior a fração volumétrica de vazios, menor a área da seção transversal que efetivamente responderá a solicitações sob tensão, o que diminui de maneira substancial a resistência à tração e o limite de escoamento, dentre outras propriedades.

Softwares de modelagem que utilizam o método de elementos finitos, que têm como objetivo a predição da distribuição das temperaturas do molde e do metal durante e depois do enchimento do molde, padrões de solidificação e as posições, tamanhos e configurações dos massalotes necessários para a prevenção de rechupes são meios eficazes de prevenir a aparição destes tipos de defeitos (KAUFMAN et al., 2004).

A porosidade em peças fundidas, originada das condições citadas (contração, gases aprisionados, hidrogênio), pode ser prevenida ou minimizada através das seguintes técnicas:

- O fundido deve ser tratado de modo que ocorra a remoção efetiva de óxidos e outros elementos não metálicos indesejados e para que haja a redução dos teores de hidrogênio dissolvido;
- O manuseio, vazamento e projeto do sistema de alimentação devem ser realizados de maneira a prevenir e minimizar a ocorrência de turbulências e outros causadores de defeitos, preservando a qualidade do metal fundido;
- Os sistemas de alimentação e massalotagem devem ser capazes de minimizar ou prevenir as porosidades de contração.

Para que a solução de defeitos seja realizada de maneira apropriada, é necessário identificar adequadamente quais defeitos estão presentes nas peças fundidas: tipicamente, porosidades de hidrogênio aparecem como vazios uniformemente distribuídos enquanto poros de contração são mais localizados ou concentrados – mas isso não é necessariamente verdadeiro em todos os casos. A realização de análises radiográficas auxilia na distinção destas discontinuidades (KAUFMAN et al., 2004).

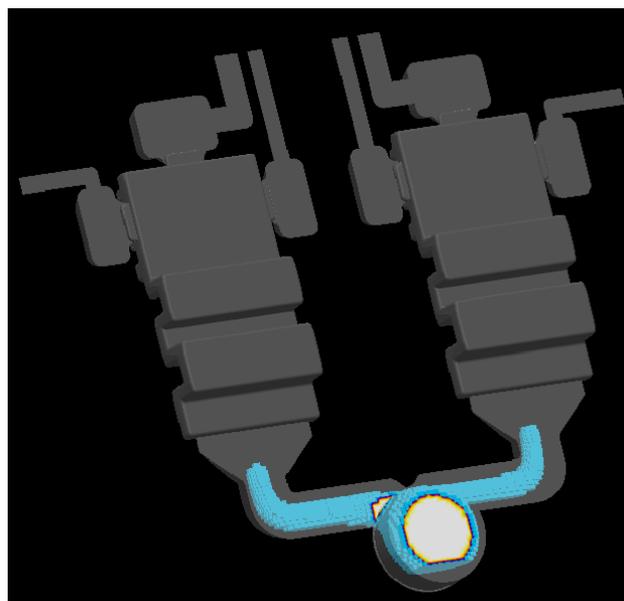
## 4. Metodologia

Todos os procedimentos experimentais realizados e suas análises posteriores ocorreram no Centro de Tecnologia em Metalurgia e Materiais (CTMM), localizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

### 4.1 Modelagem matemática

Utilizando o software MAGMASOFT®, que utiliza o método de elementos finitos para a simulação do processo de fundição de ligas aplicado à indústria automotiva e indústria pesada, foram realizadas simulações da fundição da peça esquematizada na figura 11, sob as mesmas condições experimentais, sendo que a diferença entre as simulações era, primeiramente, a velocidade do pistão no segundo estágio. Foram escolhidos três valores de velocidades adequados à injetora na qual seriam realizados os experimentos práticos: um valor de velocidade relativamente baixo (0,5 m/s), um valor médio (2 m/s) e um valor alto de velocidade (4 m/s). Nesta etapa, a pressão de intensificação não era aplicada às peças fundidas.

Figura 11 – Modelo da peça injetada simulado no software MAGMASOFT®



Fonte: Aatoria própria (2019).

É interessante observar a geometria não convencional das peças simuladas (e, conseqüentemente, produzidas): este formato se deve à realização de experimentos anteriores aos realizados neste trabalho. Estes experimentos visavam testar a resistência dos moldes às condições mais adversas, o que incluiria uma geometria de molde deveras complexa, com diversos cantos vivos que, por exemplo, aumentariam a turbulência do fluxo do metal fundido no enchimento das cavidades do molde. Devido ao alto custo de substituição do molde danificado no projeto anterior por um molde novo, optou-se por testar as condições na mesma geometria utilizada no mesmo.

A partir dos resultados obtidos, foram escolhidos dois valores que demonstravam, quanto aos resultados de porosidade da peça, uma maior qualidade estrutural. Pelos resultados do MAGMASOFT®, as amostras cuja porosidade era minimizada foram aquelas de velocidades do pistão no segundo estágio de 0,5 m/s e 4 m/s.

Foram, então, realizadas simulações com estes valores de velocidade de pistão com a adição de valores de pressão de intensificação. Para cada uma das velocidades, foram simulados um valor de pressão de intensificação intermediário (400 bar ou 40 MPa) e um valor alto (600 bar ou 60 MPa).

Os resultados foram analisados e seguiu-se para a etapa de produção das peças injetadas.

Em todas as simulações, foram simulados 9 ciclos de injeção para cada peça, de modo que o sistema estivesse estabilizado, encontrando-se no estado de regime, assim como seria feito experimentalmente.

A partir da análise dos resultados de porosidade das peças, optou-se por avaliar, dentre o volume total, a região superior da peça, composta pelo paralelepípedo de maior volume, acompanhado de três bolsas de ar laterais.

## **4.2 Experimentos**

### **4.2.1 Equipamentos**

Os experimentos de injeção foram realizados numa injetora de modelo FRECH QC210 (Figura 12) e a análise das amostras foi realizada utilizando um

microscópio estéreo do modelo Leica M165 C (Figura 13); as imagens coletadas pelo microscópio foram obtidas utilizando o software integrado ao microscópio.

Figura 12 – Injetora utilizada na injeção das peças produzidas



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 13 – Microscópio utilizado na análise das peças injetadas



Fonte: Autoria própria (2019).

#### **4.2.2 Procedimento experimental**

Após a etapa de simulações, ocorreu a injeção das peças. No entanto, há dois fatores a se ressaltar:

1. Devido a experimentos anteriormente realizados na injetora, um dos lados do molde da peça (que, como mostra a figura 11, é composta de

duas partes espelhadas) foi obstruído, de maneira que foi injetado apenas um dos lados da peça originalmente projetada e simulada no software MAGMASOFT® (Figura 14).

2. A produção das peças injetadas a 0,5 m/s ocorreu normalmente. Todavia, ao realizar-se a injeção de peças a 4 m/s, a injetora não possuía pressão de fechamento suficiente, o que causou a ocorrência de vazamentos e espirros de metal fundido. Então, por questões de segurança, optou-se pela realização dos experimentos à velocidade previamente simulada de 2 m/s.

Como citado, a injeção das peças com velocidade de pistão de 0,5 m/s sem pressão de intensificação ocorreu sem problemas, assim como as injeções subsequentes. A seguir, injetaram-se as peças de 2 m/s sem pressão de intensificação, peças de 0,5 m/s com pressão de intensificação no valor de 500 bar (50 MPa) e, finalmente, foram injetadas 9 peças com velocidade de pistão de 2 m/s e pressão de intensificação de 600 bar (60 MPa), de acordo com a capacidade da injetora.

As peças produzidas foram fotografadas, e a nona peça produzida para cada condição foi separada. Houve, então a separação do paralelepípedo superior (região a ser analisada subseqüentemente) da peça completa e sua separação das bolsas de ar, com a utilização de um martelo.

As amostras foram, então, levadas para o laboratório de metalografia.

#### **4.2.3 Análise metalográfica**

Com os paralelepípedos de cada condição separados, realizou-se o corte dos mesmos em quatro seções, de tamanhos relativamente iguais. Todas as amostras foram, então, lixadas em lixadeiras rotativas, com as malhas #100, #240, #360, #400, #600, #800 e #1000.

As amostras foram levadas para a seção de microscopia do laboratório e analisadas, e imagens dos defeitos encontrados foram obtidas.

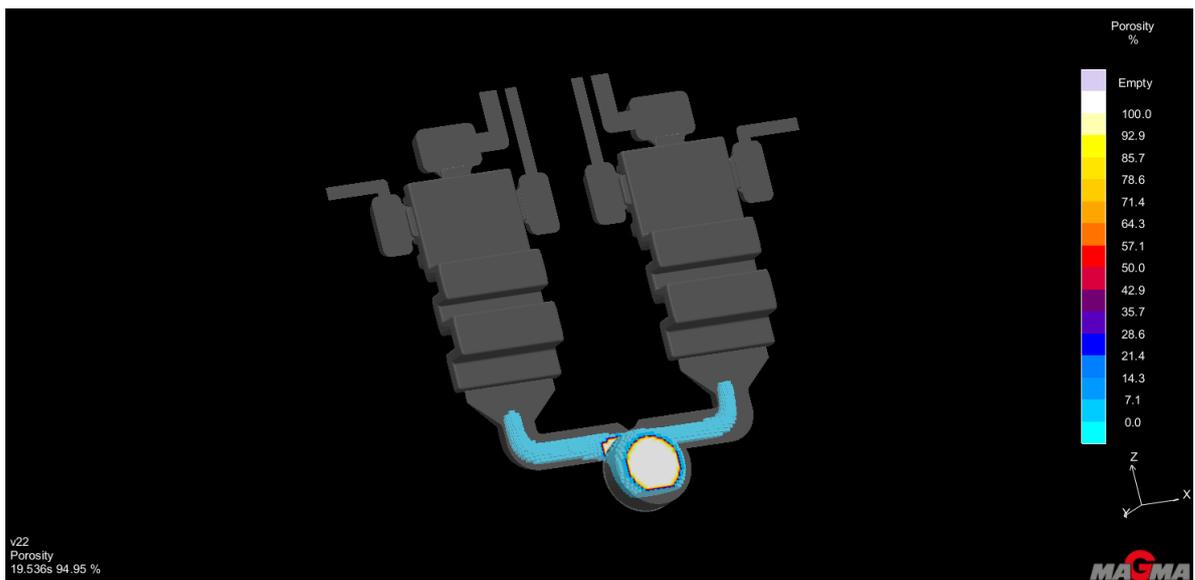
## 5. Resultados e discussão

### 5.1 Modelagem matemática do processo HPDC - Magmasoft

#### 5.1.1 Efeito da velocidade do pistão

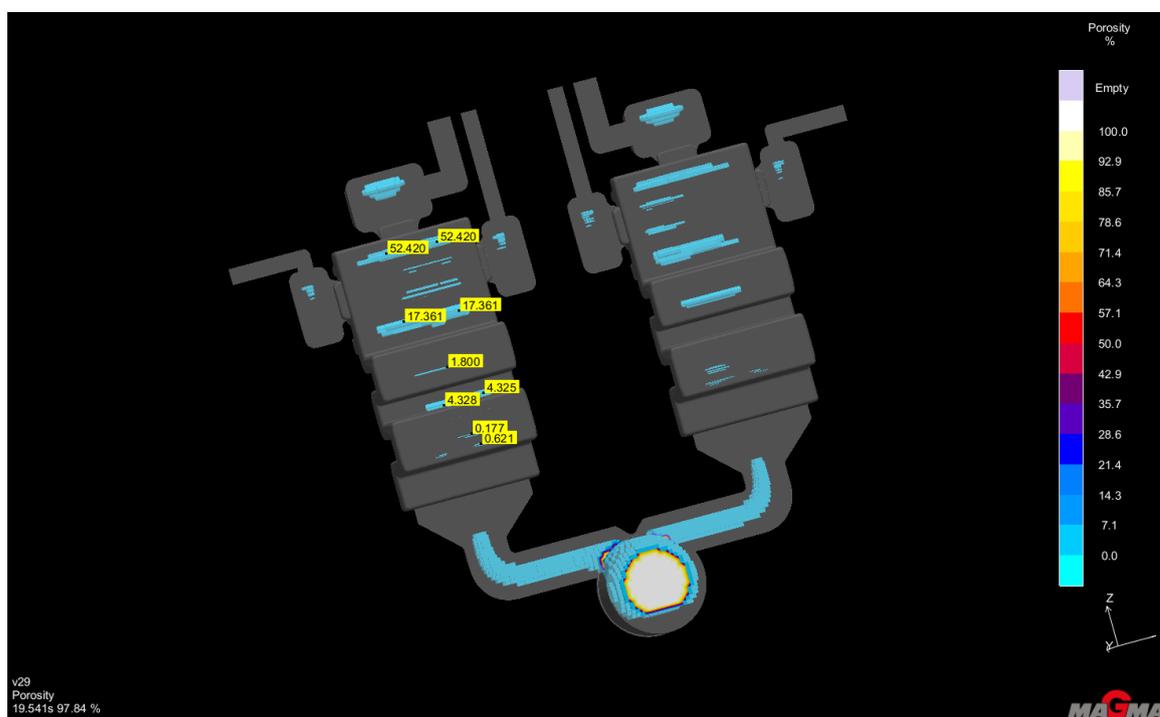
Com a condição de alteração somente na velocidade do pistão no segundo estágio de injeção e sem pressão de intensificação, foram obtidas as seguintes imagens advindas das simulações realizadas no software MAGMASOFT® (Figuras 14, 15 e 16):

Figura 14 – Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 0,5 m/s sem pressão de intensificação.



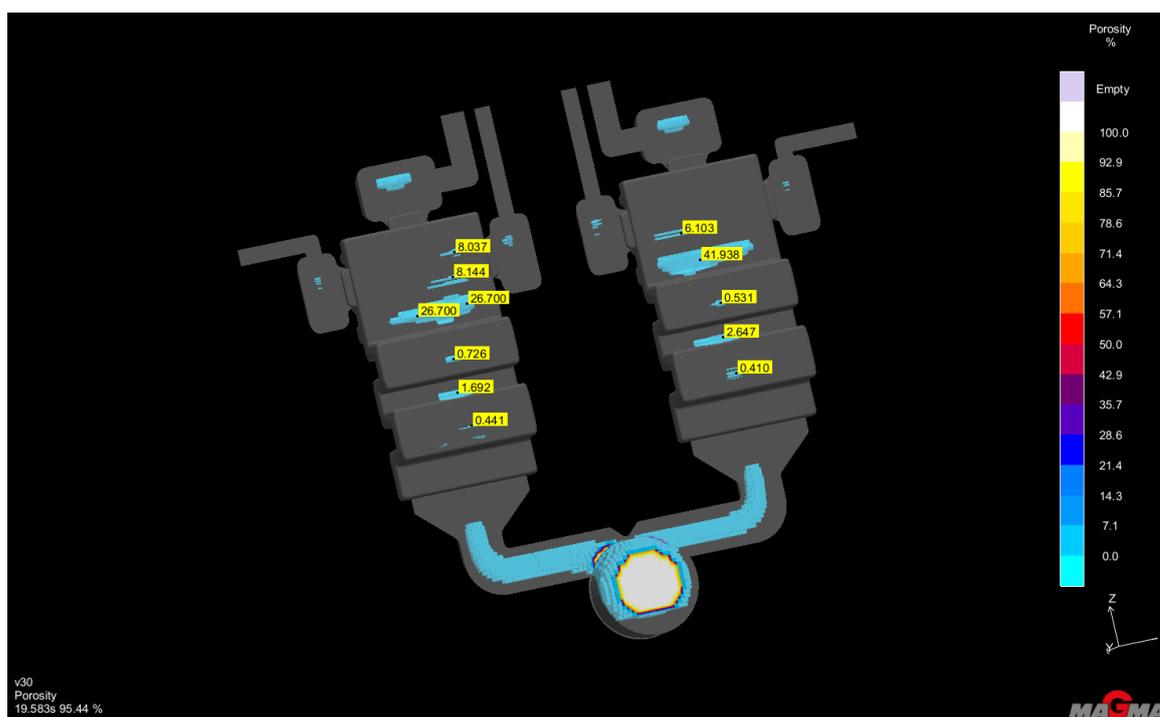
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 15 – Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 2 m/s sem pressão de intensificação.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 16 – Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 4 m/s sem pressão de intensificação.



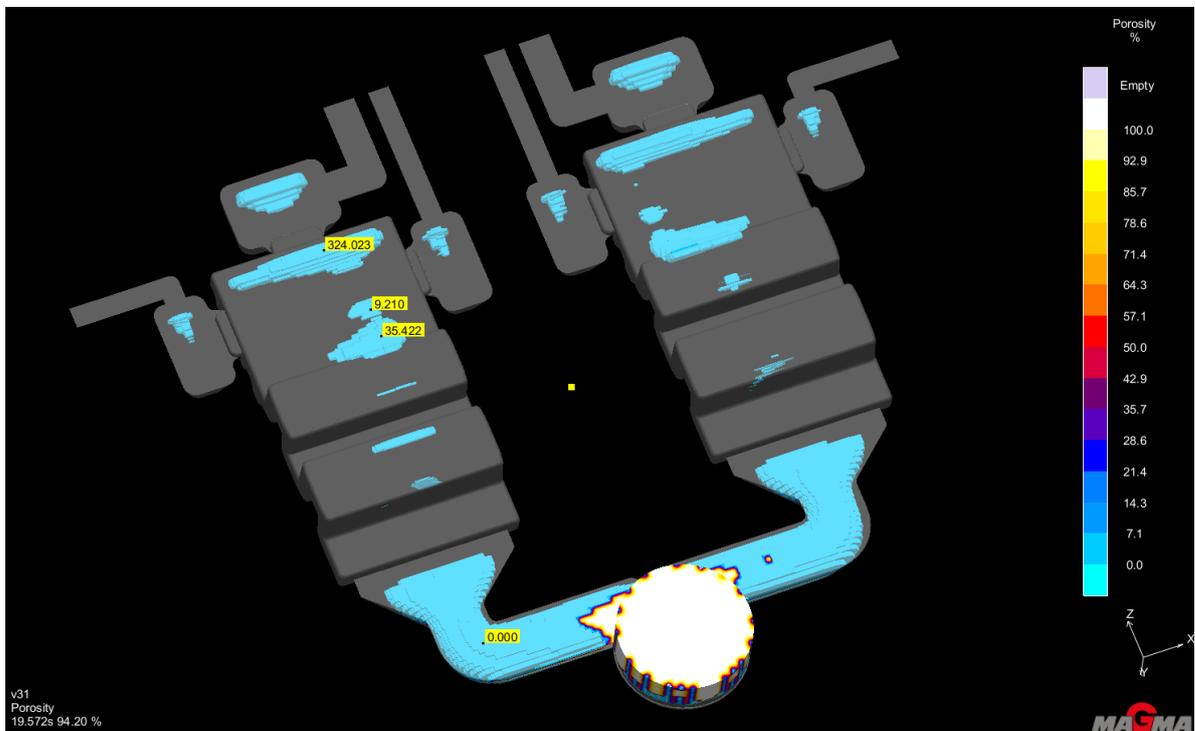
Fonte: Autoria própria (2019).

A partir destes resultados de simulação, observa-se que a peça com menor quantidade de porosidades seria a injetada a 0,5 m/s, seguida pela peça de 4 m/s, com o maior teor de porosidades presente na amostra injetada a 2 m/s, porosidades estas distribuídas por toda a peça e em maior quantidade que na amostra (também porosa) de 4 m/s.

### 5.1.2 Efeito da pressão de intensificação

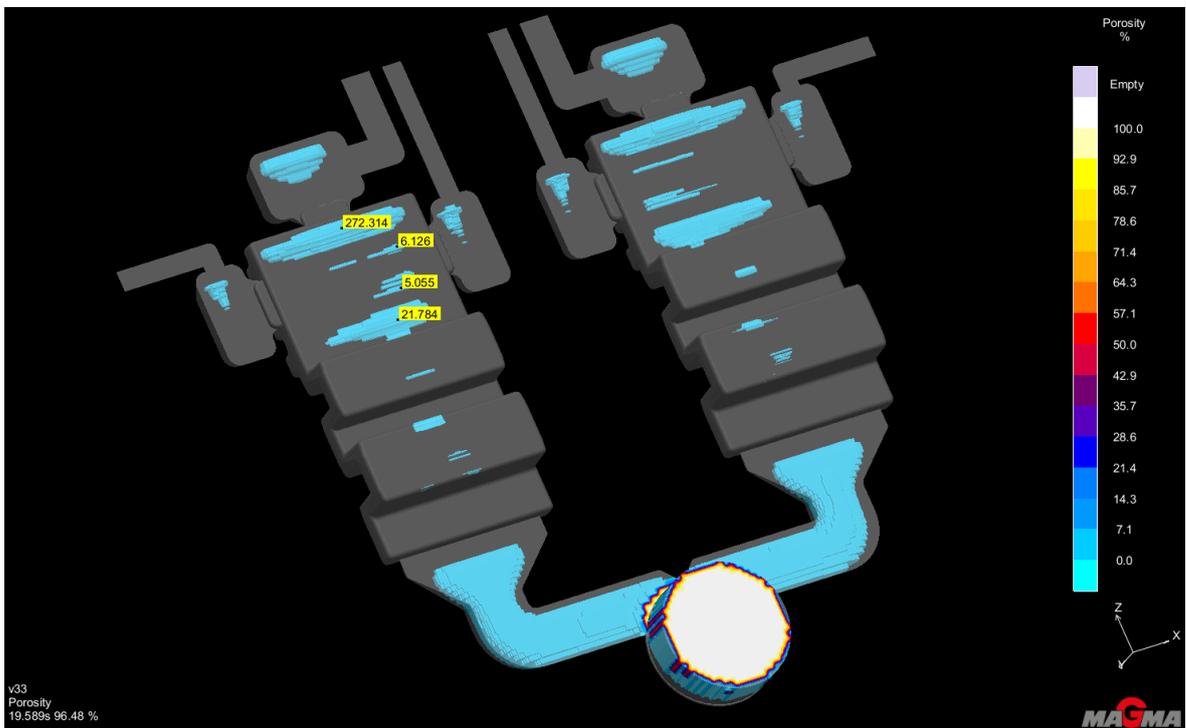
A partir dos resultados das simulações que alteravam apenas a velocidade do pistão no segundo estágio, escolheu-se as amostras de 0,5 m/s e 4 m/s para passarem pelo processo de simulação com pressão de intensificação, com os valores desta grandeza simulados como 400 bar (40 MPa) e 600 bar (60 MPa). Os resultados obtidos pelo processo são demonstrados pelas figuras 17, 18, 19 e 20, como segue:

Figura 17 – Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 0,5 m/s, com pressão de intensificação no valor de 400 bar (40 MPa).



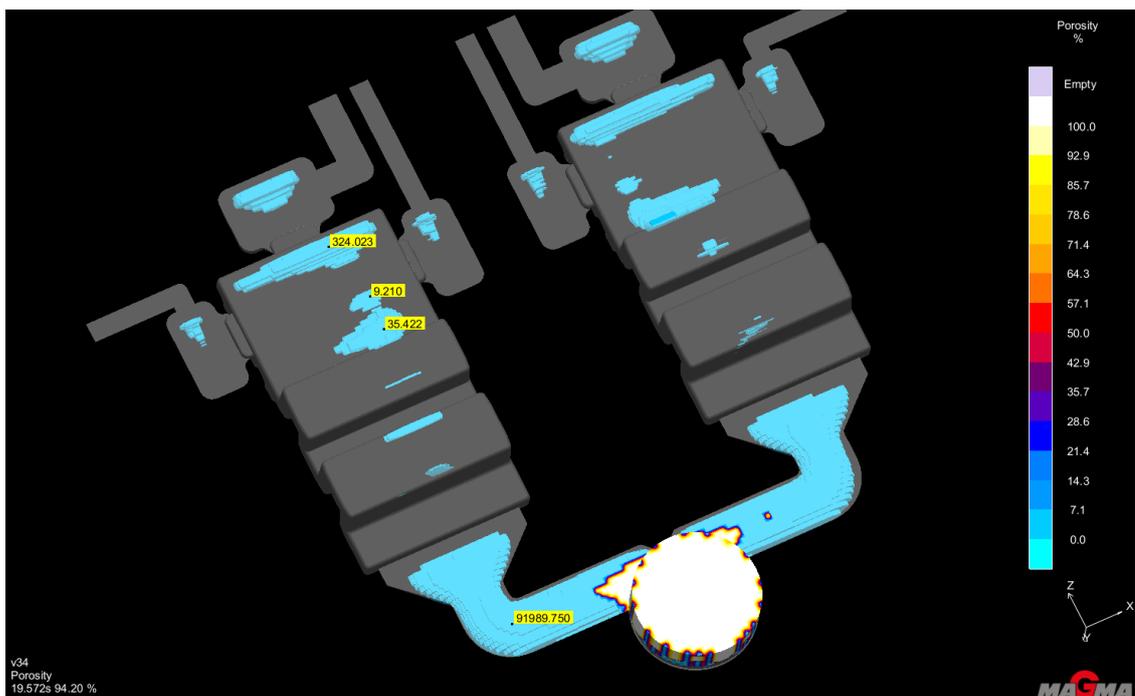
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 18 – Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 4 m/s com pressão de intensificação no valor de 400 bar (40 MPa).



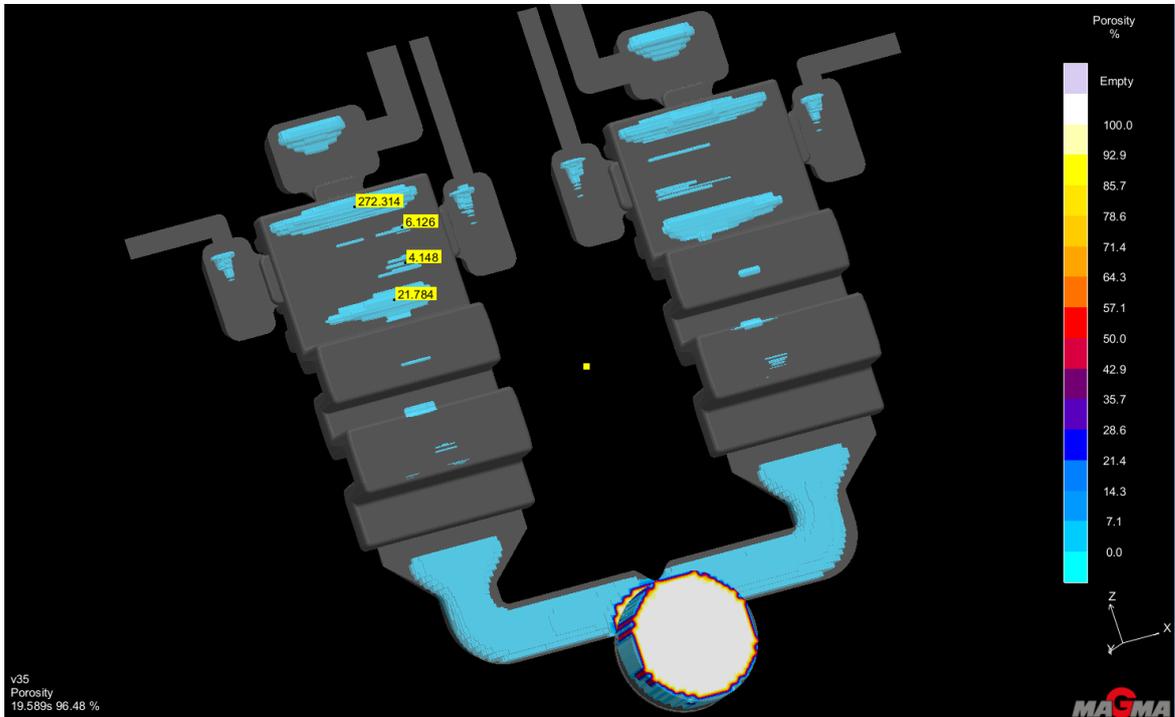
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 19 – Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 0,5 m/s com pressão de intensificação no valor de 600 bar (60 MPa).



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 20 – Resultados de porosidade na simulação de velocidade de pistão 4 m/s com pressão de intensificação no valor de 600 bar (60 MPa).



Fonte: Autoria própria (2019).

Analisando os resultados das simulações obtidas, os valores de porosidade representados para as quatro condições simuladas não apresentam diferenças significativas entre si; a partir daí, foi então decidido que seriam simuladas as condições de maior pressão de intensificação (600 bar), de maneira a se avaliar seu efeito na porosidade de peças reais injetadas quando seu valor fosse o máximo possível.

## 5.2 Experimentos

Como observado nas considerações iniciais desta seção, a injeção das peças à velocidade de 4 m/s não foi possível; os experimentos foram realizados, então, nas seguintes condições: 0,5 m/s sem pressão de intensificação, 0,5 m/s com IP de 500 bar, 2 m/s sem pressão de intensificação e 2 m/s com IP de 600 bar. Devido a complicações de ordem prática, a simulação gráfica dos processos com pressão de intensificação atuante acima citados não pôde ser realizada.

### 5.2.1 Observações gerais

As peças fundidas no estado de bruto possuíam a configuração apresentada na figura 21, antes da retirada da bolacha, dos canais de alimentação e das bolsas:

Figura 21 – Configuração das peças fundidas em bruto



Fonte: Autoria própria (2019).

A partir daí, houve a retirada dos elementos exógenos às peças e as mesmas foram fotografadas. As amostras estão expostas nas figuras 22, 23, 24 e 25, em que estão presentes todas as amostras produzidas, nos nove ciclos, frente e verso:

Figura 22 – Amostras produzidas sob as condições de velocidade de pistão de 0,5 m/s, sem pressão de intensificação – vistas superior (esquerda) e inferior (direita)



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 23 – Amostras produzidas sob as condições de velocidade de pistão de 2 m/s, sem pressão de intensificação – vistas superior (esquerda) e inferior (direita)



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 24 – Amostras produzidas sob as condições de velocidade de pistão de 0,5 m/s, com pressão de intensificação de 500 bar – vistas superior (esquerda) e inferior (direita)



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 25 – Amostras produzidas sob as condições de velocidade de pistão de 2 m/s, com pressão de intensificação de 600 bar – vistas superior (esquerda) e inferior (direita)



Fonte: Autoria própria (2019).

Analisando as imagens, percebe-se que, em todas as condições, o acabamento superficial das amostras não é ideal. Além disso, não se nota uma melhora continuada com a progressão dos ciclos de produção das amostras, ou seja, a última peça produzida não necessariamente é aquela com o melhor acabamento em condição de bruto. Nota-se a presença, em alguns exemplares fundidos, de juntas frias e rebarbas.

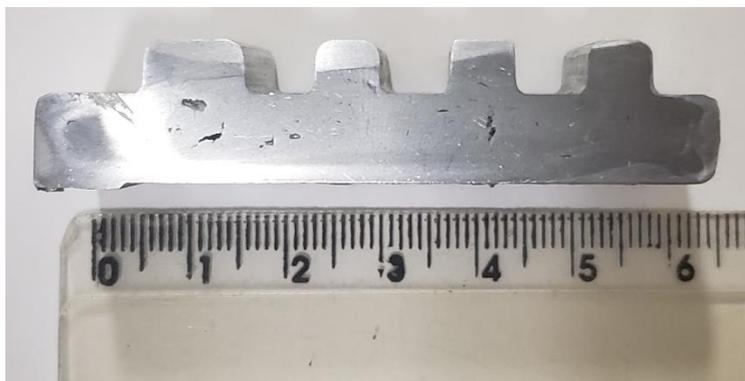
### **5.2.2 Análise metalográfica**

Após o corte e lixamento das amostras separadas (foram separadas a nona amostra de cada condição testada), as mesmas foram levadas para a análise no microscópio estéreo. Os resultados observados são apresentados nas subseções seguintes.

#### **5.2.2.1 Amostra com velocidade de pistão no segundo estágio de 0,5 m/s, sem pressão de intensificação**

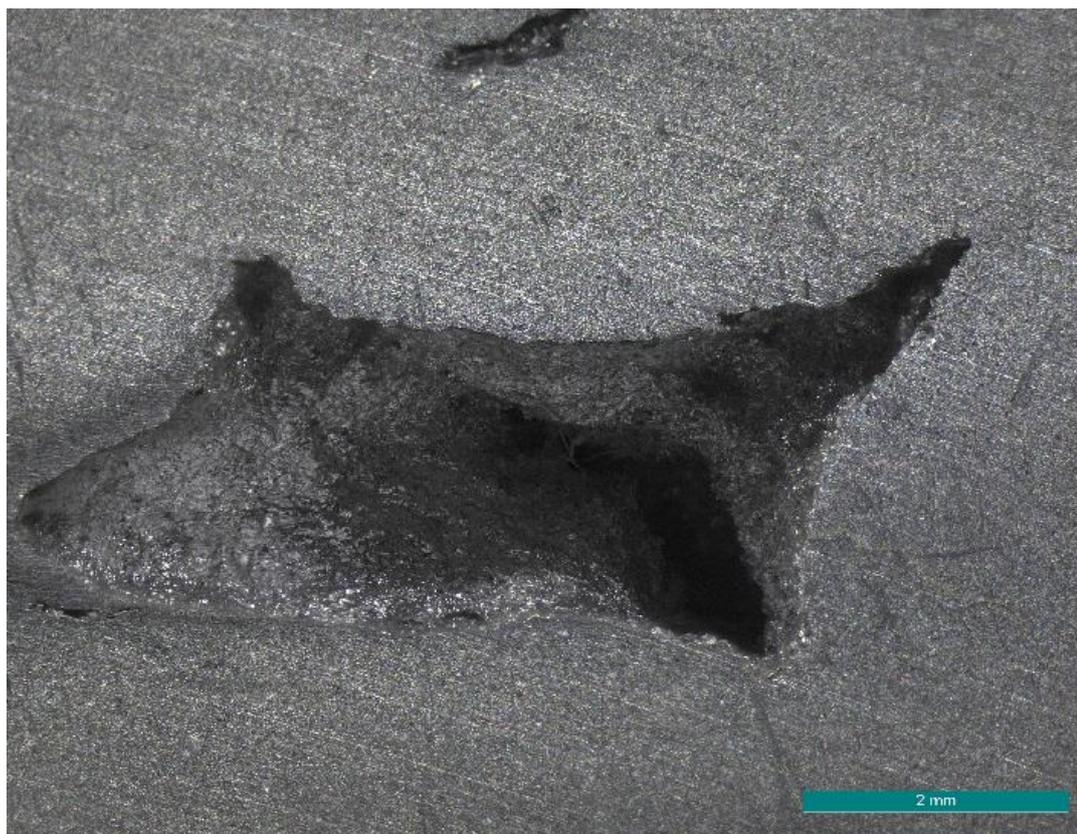
A amostra de velocidade 0,5 m/s sem pressão de intensificação (figura 26) caracterizou-se pela presença de poros de contração profundos (figuras 27 e 28) em baixa quantidade, visíveis a olho nu, localizados majoritariamente nas regiões superior e inferior do paralelepípedo. Também nota-se a presença de poros mistos, nos quais interagiram as porosidades de contração e gasosas (figura 29). Ocorreu a formação de óxido de alumínio na superfície interna das porosidades.

Figura 26 – Visão superior de uma das faces das amostras retiradas da peça fundida a 0,5 m/s sem pressão de intensificação.



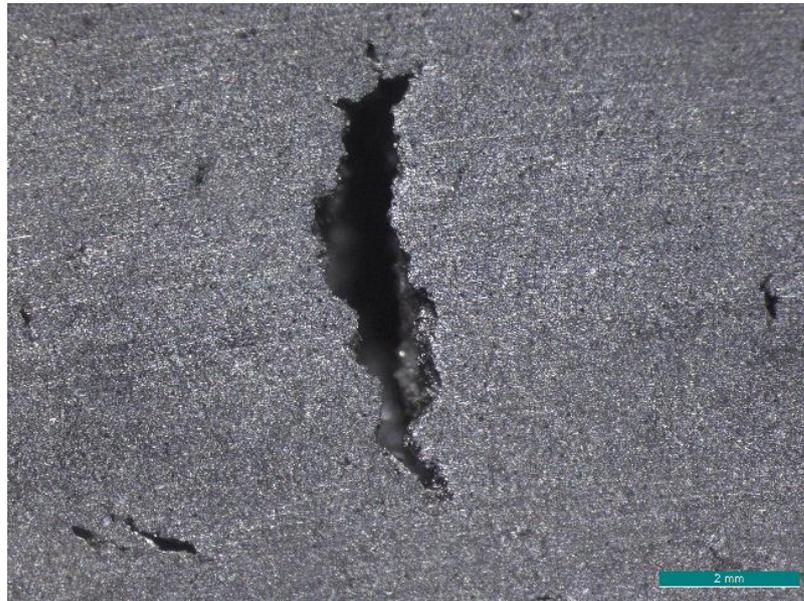
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 27 – Detalhe de uma porosidade de contração presente na amostra fundida a 0,5 m/s sem pressão de intensificação (aumento de 16x).



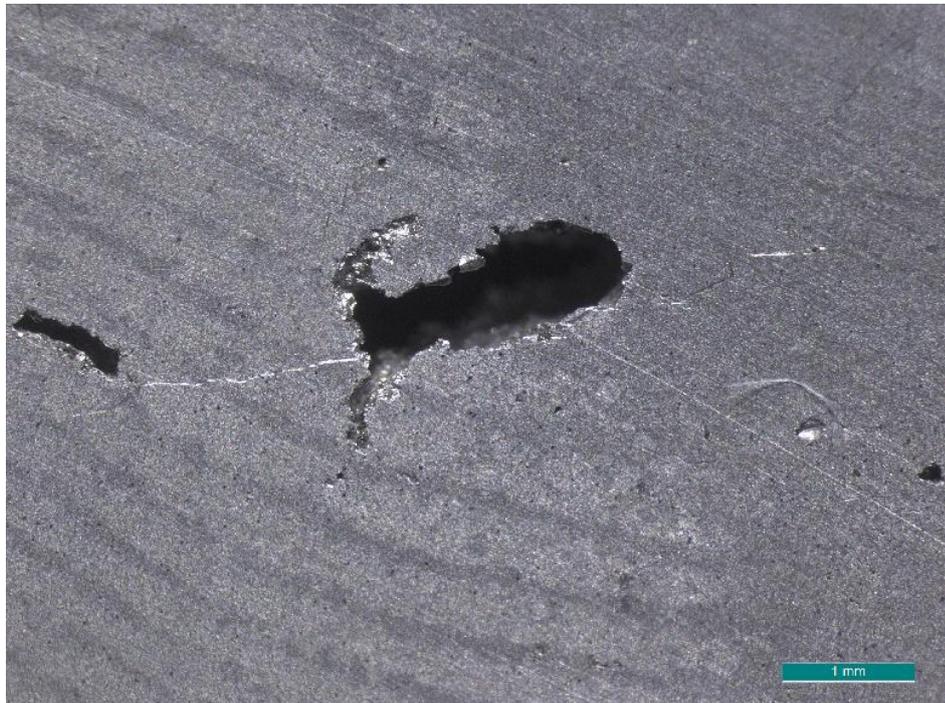
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 28 – Detalhe de uma porosidade de contração presente na amostra fundida a 0,5 m/s sem pressão de intensificação (aumento de 16x).



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 29 – Detalhe de uma porosidade mista de origem gasosa e de contração presente na amostra fundida a 0,5 m/s sem pressão de intensificação (aumento de 20x).

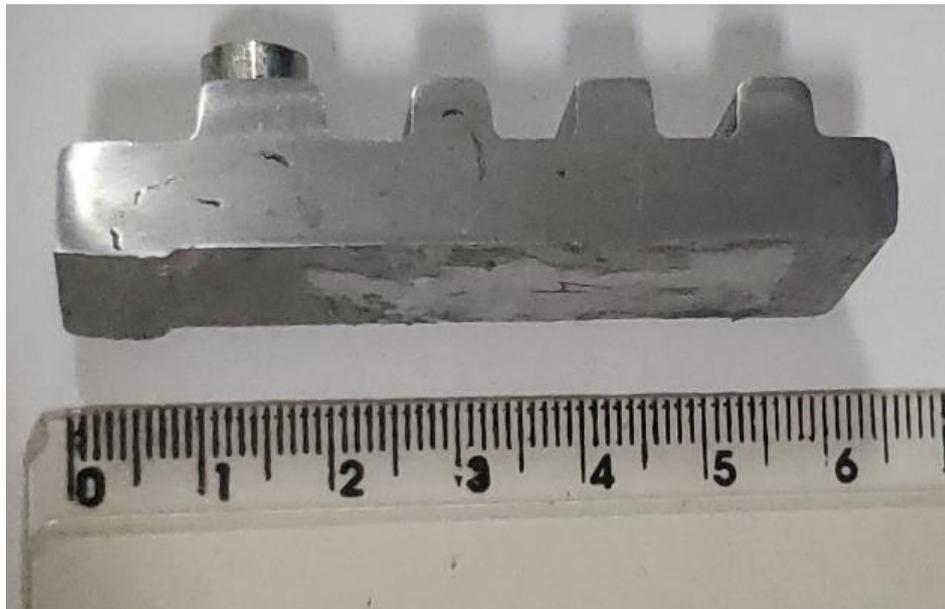


Fonte: Autoria própria (2019).

### 5.2.2.2 Amostra com velocidade de pistão no segundo estágio de 0,5 m/s e pressão de intensificação de 500 bar (50 MPa)

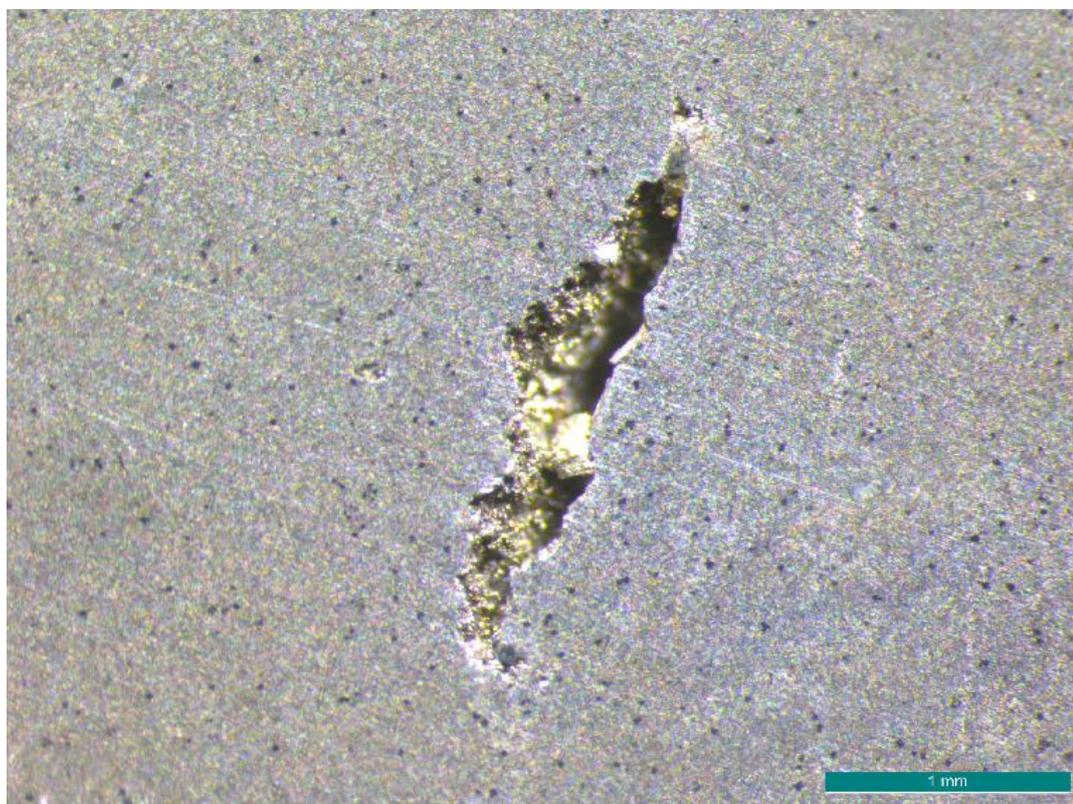
A peça fundida a 0,5 m/s com pressão de intensificação de 500 bar (figura 30) caracteriza-se pela ocorrência de poros de contração, localizados na região inferior da peça. Nota-se, também, a presença de microporosidades de hidrogênio (figura 31) espalhadas por toda a superfície da mesma e a ocorrência de alguns poros de origem gasosa, de formato arredondado (figura 32). A figura 33 apresenta a ocorrência de dois poros gasosos, ligados por uma trinca, provavelmente originada durante a solidificação, devida à contração que ocorre na mudança do estado líquido para o sólido. Ocorreu, também, a formação de óxido de alumínio na superfície interna das porosidades.

Figura 30 - Visão superior de uma das faces das amostras retiradas da peça fundida a 0,5 m/s com pressão de intensificação no valor de 500 bar.



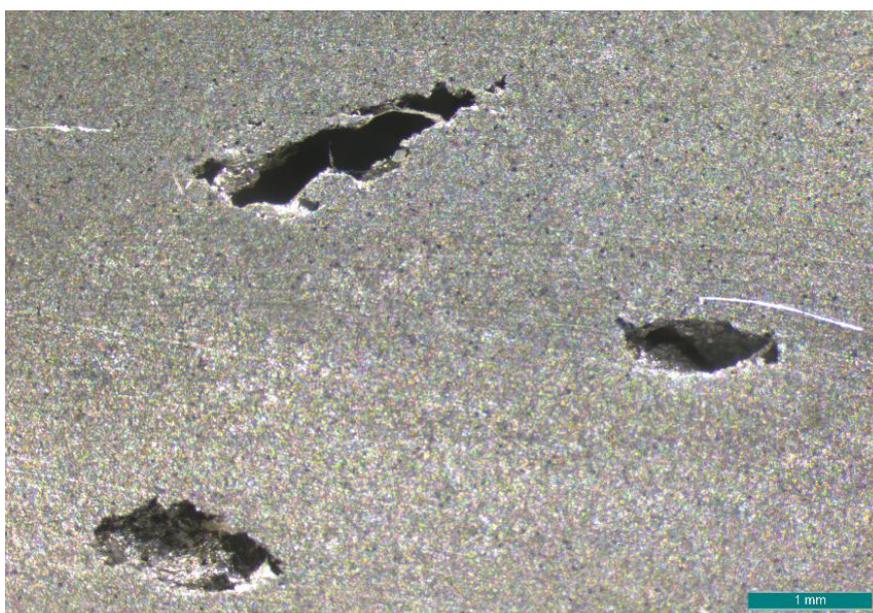
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 31 – Detalhe da presença de porosidade de contração e microporosidades de hidrogênio na peça fundida a 0,5 m/s com IP de 500 bar (aumento de 32x).



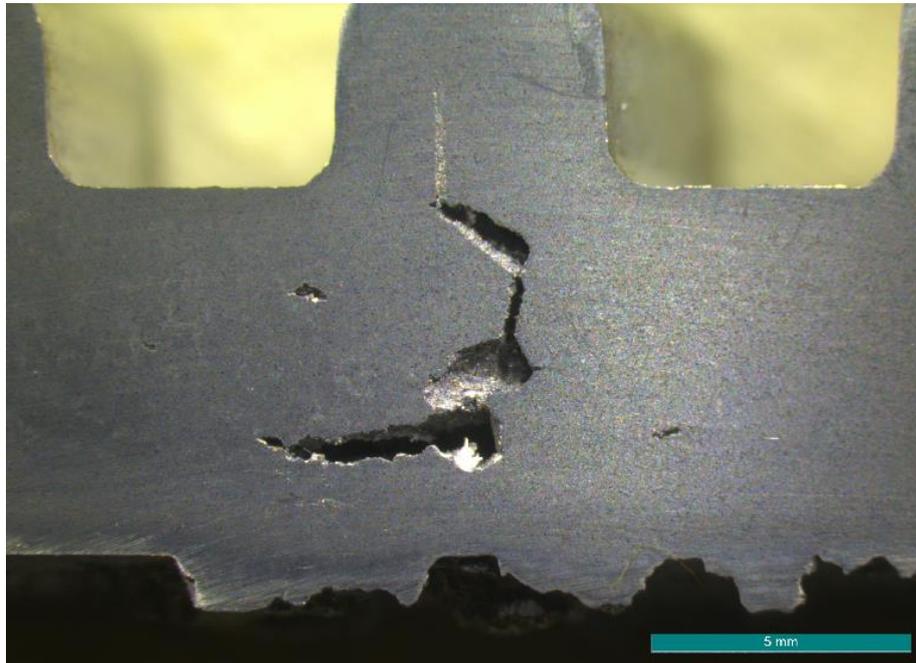
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 32 – Detalhe da presença de porosidade de contração e poros de origem gasosa na peça fundida a 0,5 m/s com IP de 500 bar (aumento de 20x).



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 33 – Detalhe da presença de porosidades de origem gasosa interligados por uma trinca na peça fundida a 0,5 m/s com IP de 500 bar (aumento de 7,3x).



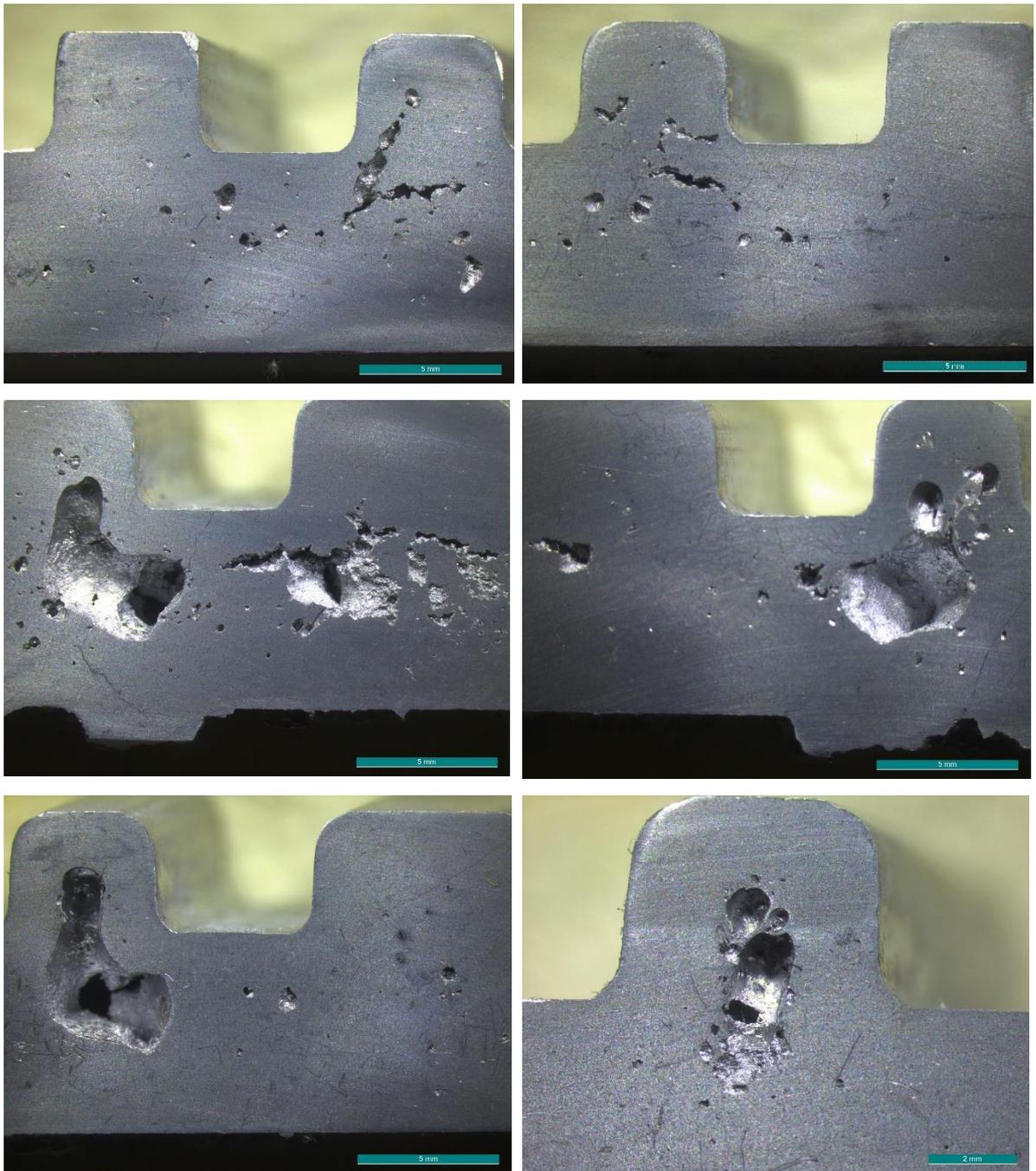
Fonte: Autoria própria (2019).

### **5.2.2.3 Amostra com velocidade de pistão no segundo estágio de 2 m/s sem pressão de intensificação**

A peça injetada a 2 m/s sem pressão de intensificação apresentou a maior fração volumétrica de porosidades visíveis a olho nu. Isso se deve à formação de um poro gasoso que perpassava longitudinalmente toda a peça na região inferior. A hipótese levantada que explica a ocorrência de tal defeito tão flagrante na peça é a de que, como houve um aumento na velocidade de injeção, ocorreu um aumento na turbulência do transporte do fundido da bucha de injeção para a cavidade do molde (em relação às peças previamente injetadas à baixa velocidade de 0,5 m/s), mas sem a presença da pressão de intensificação para amainar os efeitos desta turbulência gerada. Isto resultou no aprisionamento de grandes bolhas de gás na última região alcançada pelo fluxo de metal líquido, ou seja, a metade inferior do paralelepípedo injetado. A figura 34 mostra a continuidade deste defeito através da amostra, em imagens posicionadas lado a lado

Também notou-se a presença de poros de contração e formação de óxido de alumínio na superfície interna das porosidades formadas.

Figura 34 – Sequência de imagens que representa a continuidade de uma porosidade de gás encontrada na peça fundida a 2 m/s, sem pressão de intensificação (todas as imagens têm aumento de 7,3x, exceto a imagem na parte inferior à esquerda da sequência, que tem aumento de 12,5x).

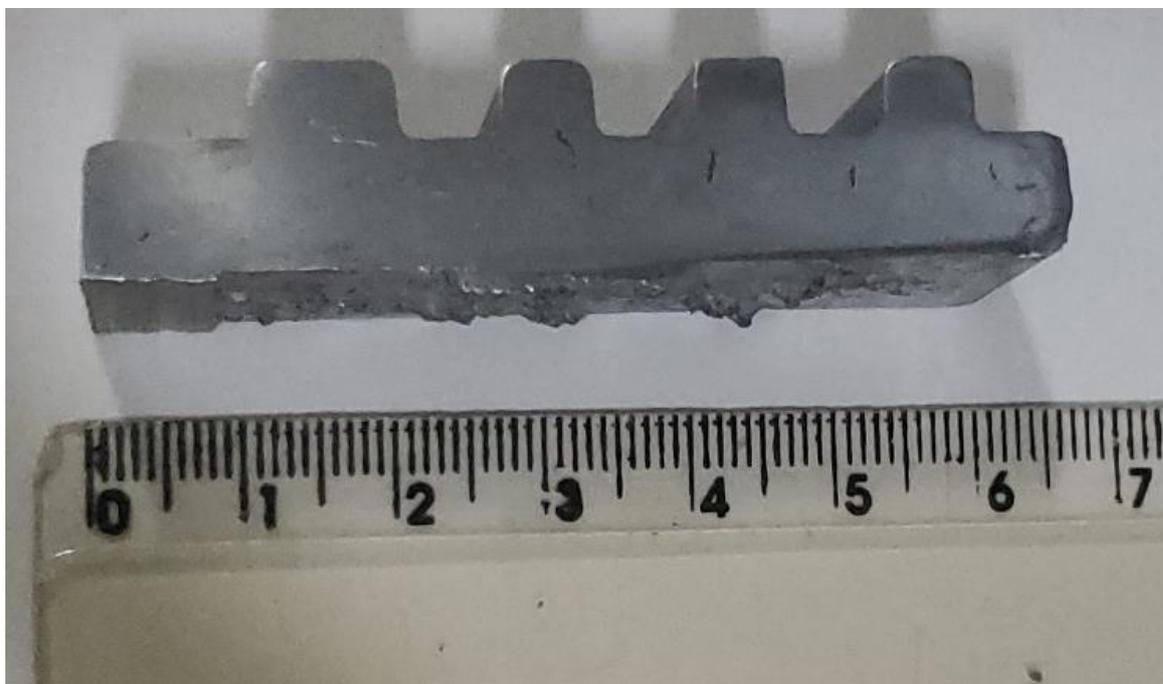


Fonte: Autoria própria (2019).

#### 5.2.2.4 Amostra com velocidade de pistão no segundo estágio de 2 m/s com pressão de intensificação de 600 bar (60 MPa)

A peça injetada à velocidade de 2 m/s com pressão de intensificação de 600 bar (figura 35) possui morfologia semelhante à da peça fundida com velocidade de 0,5 m/s com IP de 500 bar: poucos poros grandes, a maioria de contração, localizados numa parte da peça (neste caso, na região superior da mesma). Também nota-se a presença de alguns poucos poros de origem gasosa, poros mistos (gasosos e de contração) e a presença de microporosidades de hidrogênio distribuídas homogeneamente pelo volume (figura 36). Ocorreu, também, a formação de óxido de alumínio na superfície interna das porosidades formadas.

Figura 35 – Visão superior de uma das faces das amostras retiradas da peça fundida a 2 m/s com pressão de intensificação no valor de 600 bar.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 36 – Visão superior de uma das faces das amostras retiradas da peça fundida a 2 m/s com pressão de intensificação no valor de 600 bar (aumento de 16x).



Fonte: Autoria própria (2019).

## 6. Conclusões

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que, em todas as condições testadas, ocorreu a formação, em maior ou menor grau, de porosidades. Isso é danoso para a sanidade da peça e a integralidade de suas propriedades mecânicas, de onde deduz-se que nenhuma das condições testadas é a ideal para a geometria da peça injetada.

Quanto à influência das variáveis testadas, a alteração na velocidade do pistão no segundo estágio foi avaliada em duas frentes e delas foram tiradas as seguintes conclusões:

- Nas amostras injetadas sem a presença da pressão de intensificação, o aumento da velocidade levou a um aumento na turbulência gerada no processo de injeção, o que levou à formação de poros gasosos catastróficos que, numa linha de produção, levariam ao descarte imediato da peça fundida.
- Nas amostras injetadas na presença de pressão de intensificação no terceiro estágio, o aumento de velocidade não levou a mudanças significativas nas peças produzidas.

A presença (ou ausência) da pressão de intensificação no terceiro estágio, para ambas as velocidades testadas, leva-nos a inferir que a realização desta etapa melhora significativamente a questão das porosidades nas peças injetadas sob pressão: em ambos os casos, as amostras fundidas sem a aplicação da pressão apresentavam porosidades visíveis a olho nu, que atingiam a escala dos 5 mm de comprimento (o que torna as peças inutilizáveis na indústria que faz uso deste tipo de processo de fabricação); com a presença da pressão de intensificação, a fração volumétrica de porosidades evidentes foi visivelmente reduzida – ainda que não eliminada completamente.

É necessário ressaltar, no entanto, que apenas a mudança na velocidade de injeção no segundo pistão ou nos valores de pressão de intensificação não é suficiente para remediar totalmente a questão da porosidade em peças injetadas: deve-se levar em conta a geometria da peça a ser produzida, o desenho dos sistemas de canais, a temperatura da liga fundida e do molde, quantidade de lubrificante aplicada, dentre outros inúmeros fatores que afetarão a qualidade das peças finais produzidas; este é um estudo particular de cada configuração de

fundição: a generalização de “soluções”, como se pudesse haver padronização num processo que permite a fabricação de produtos tão diversos entre si, será, muito provavelmente, um erro.

## 7. Referências bibliográficas

ADAMANE, A., ARNBERG, L., FIORESE, E., TIMELLI, G., & BONOLLO, F. Influence of Injection Parameters on the Porosity and Tensile Properties of High-Pressure Die Cast Al-Si Alloys: a Review. **EBSCOhost**, 9(1), 43–53. 2015.

CAMPBELL, J. **Castings**. Elsevier Science Ltd, 2a ed., Burlington, 2003.

DARGUSCH, M. S., DOUR, G., SCHAUER, N., DINNIS, C. M., & SAVAGE, G. The influence of pressure during solidification of high pressure die cast aluminium telecommunications components. **Journal of Materials Processing Technology**, 180(1–3), 37–43, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.05.001>

KAUFMAN, J. G., & ROOY, E. L. **Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications**. ASM International, 1a ed. Materials Park, OH, 2004.

LAUKLI, H. I., ARNBERG, L., & LOHNE, O. Effects of grain refiner additions on the grain structures in HPDC A356 castings. **International Journal of Cast Metals Research**, 18(2), 65–72, 2005. <https://doi.org/10.1179/136404605225022919>

NORWOOD, A. J., DICKENS, P. M., SOAR, R. C., & HARRIS, R. A. Surface temperature of tools during the high-pressure die casting of aluminium. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, 221(12), 1659–1664, 2007. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM745>

OTARAWANNA, S., GOURLAY, C. M., LAUKLI, H. I., & DAHLE, A. K. Microstructure formation in AlSi4MgMn and AlMg5Si2Mn high-pressure die castings. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, 40(7), 1645–1659, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-9841-1>

OTARAWANNA, S., GOURLAY, C. M., LAUKLI, H. I., & DAHLE, A. K. The thickness of defect bands in high-pressure die castings. **Materials Characterization**, 60(12), 1432–1441, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.06.016>

OTARAWANNA, S., GOURLAY, C. M., LAUKLI, H. I., & DAHLE, A. K. Feeding mechanisms in high-pressure die castings. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, 41(7), 1836–1846, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0222-6>

OUTMANI, I., FOUILLAND-PAILLE, L., ISSELIN, J., & EL MANSORI, M. (2017). Effect of Si, Cu and processing parameters on Al-Si-Cu HPDC castings. **Journal of Materials Processing Technology**, 249 (November 2016), 559–569. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.043>

PORTAL METALICA – CONSTRUÇÃO CIVIL – Desgaseificação do Alumínio. Disponível em < <http://wwwo.metalica.com.br/artigos-tecnicos/desgaseificac-o-de-aluminio>> Acesso em 05 de junho de 2019.

RAHIMI, A. **Introduction Of High Pressure Die-Casting And Common Defects In Die-Casting**, 2003

RAVI, B. Design for castability. **IIT Bombay**, dez. 2006.

TSOUKALAS, V. The Effect of Die Casting Machine Parameters on Porosity of Aluminum Die Castings. **International Journal of Cast Materials Research**, vol. 15, 000-000, jul. 2003.

WALKINGTON, W. G. **Gas Porosity: A Guide to Correcting the Problems**. 1<sup>a</sup> ed. Rosemont, IL, NADCA, 2006

WALKINGTON, W. G. & MURRAY, M. **Die Casting Defects: Causes and Solutions**. 1a ed. Rosemont, IL, NADCA, 2003

WANG, L., TURNLEY, P., & SAVAGE, G. (2011). Gas content in high pressure die castings. **Journal of Materials Processing Technology**, 211(9), 1510–1515. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.03.024>