

DEFINIÇÃO DA VELOCIDADE DE PRIMEIRA FASE EM PROJETOS DE INJEÇÃO SOB ALTA PRESSÃO DE CÂMARA FRIA COM AUXÍLIO DO MAGMASOFT®.

DEFINITION OF 1ST PHASE VELOCITY IN COLD CHAMBER HIGH PRESSURE DIE CASTING PROJECTS WITH MAGMASOFT®.

Felipe Cebukin¹

Marcelo Lopes da Silva²

Odilon de Moraes Junior³

RESUMO

Este artigo aborda aspectos teóricos, valendo-se de modelos clássicos da literatura, sobre determinação da velocidade de primeira fase em processos de injeção em alta pressão, parâmetro ao qual é comumente considerado, de menor importância na definição da curva de injeção nas fundições brasileiras. O uso do software de simulação numérica de fundição MAGMASOFT®, pode explicar os efeitos da definição desse parâmetro de processo, no sentido dos seus impactos na qualidade final do fundido. Pode ser também estabelecido comparativos entre a velocidade prevista via modelo teórico com os resultados obtidos por otimizações de processo via simulação para diferentes condições.

ABSTRACT

This article addresses theoretical aspects, making use of classic models from the literature, on the determination of the first phase velocity in high-pressure die casting processes, a parameter to which is commonly and mistakenly given a lower importance in the definition of the injection curve in Brazilian foundries is commonly. Using the casting numerical simulation software MAGMASOFT®, the effects of the poor definition of this process parameter in the sense of its impacts on the final quality of the casting are explained and comparisons are established between the predicted speed via theoretical model and the results obtained by process optimization via simulation for different conditions.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Processo de injeção em alta pressão

O processo de injeção em alta pressão (*high pressure die casting* ou HPDC) é um método de produção de alto volume que permite a obtenção de produtos com formato próximo do componente final acabado (*net shape*) com bom acabamento e com elevadas taxas de produção [1].

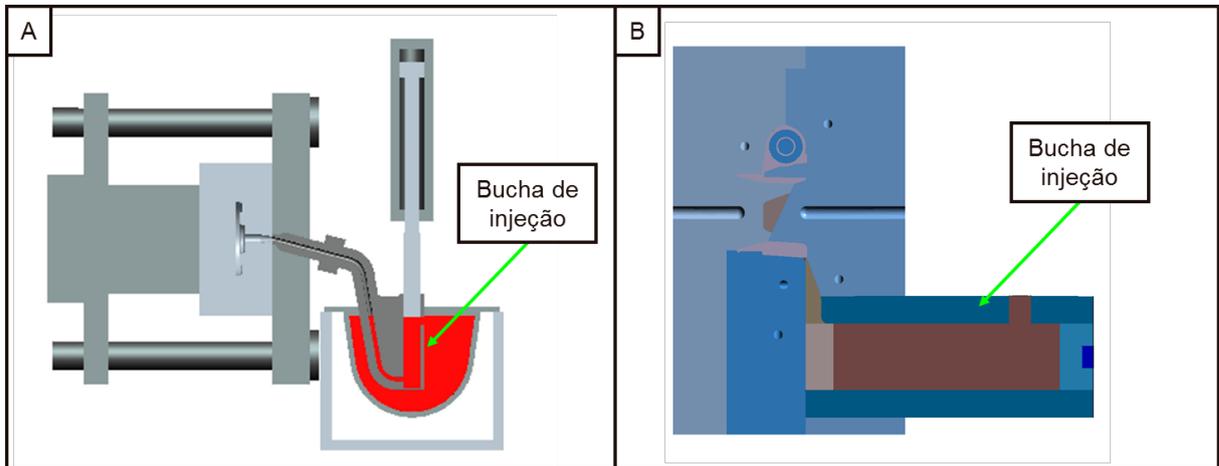
¹ Pós-graduado em Engenharia de Fundição na Faculdade SENAI Nadir Dias de Figueiredo. E-mail: felipe.cebukin@gmail.com.br

² Docente e mestre em Engenharia de materiais da Faculdade SENAI Nadir Dias de Figueiredo. E-mail: marcelo.Lsilva@sp.senai.br

³ Docente e Mestre em Engenharia de materiais da Faculdade SENAI Nadir Dias de Figueiredo. E-mail: Odilon.junior@sp.senai.br

O processo compreende, de forma geral, o preenchimento da cavidade de um molde metálico com metal líquido oriundo de uma bucha. Para sistemas de câmara quente, esta bucha fica posicionada dentro do forno de espera e para processos de câmara fria a bucha fica posicionada fora do forno, conforme pode ser observado na **Figura 1**.

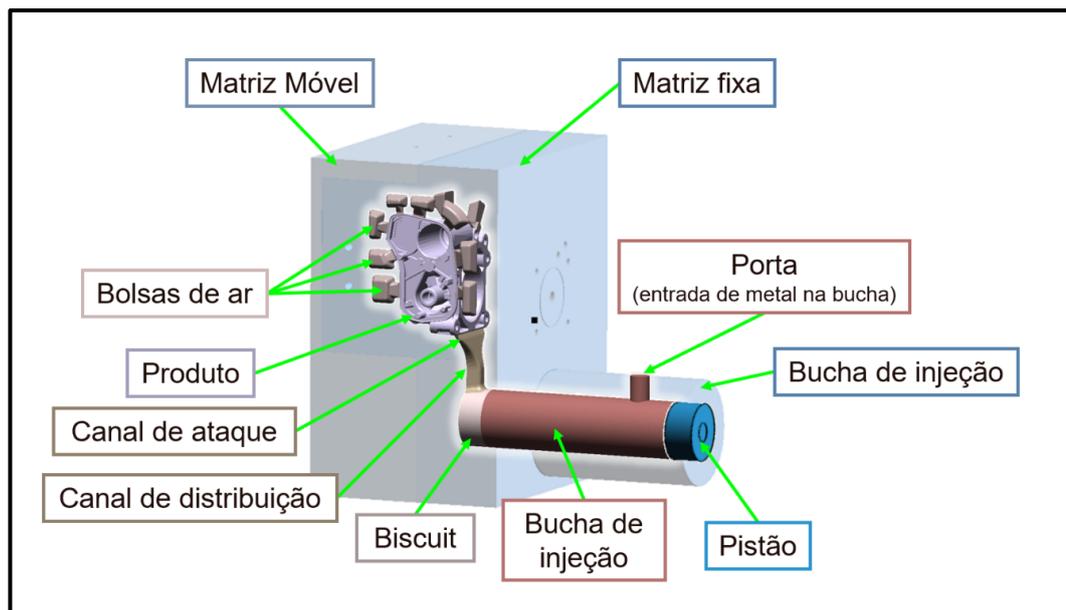
Figura 1: Esquema de ferramentas de injeção em alta pressão de câmara quente (A) e de câmara fria (B)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Para sistemas de câmara fria, o preenchimento da bucha – também chamado de dosagem – é feito com uma concha fixada num braço robotizado que transporta metal de um forno de espera até a entrada da bucha, comumente chamada de porta, conforme pode ser observado na **Figura 2**.

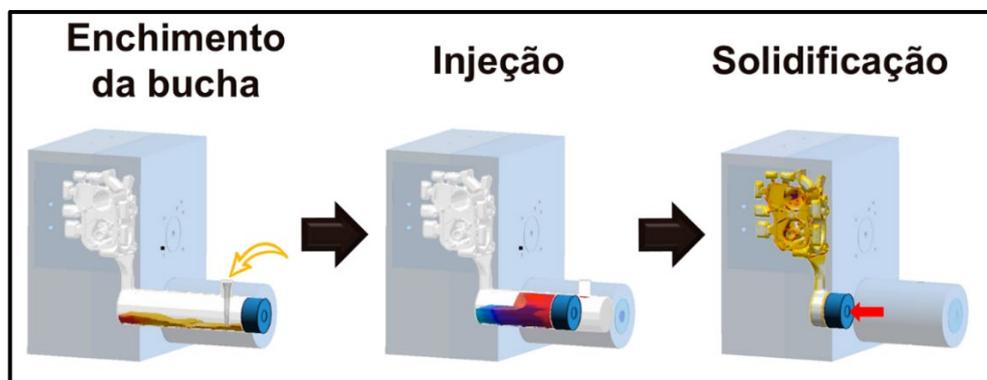
Figura 2: Esquema das diferentes partes de um sistema de fundição em alta pressão de câmara fria



Fonte: Elaborado pelo Autor

Após o final da dosagem, o metal dentro da bucha é impulsionado para o interior da cavidade pela movimentação de um pistão que se encontra retraído ao final da dosagem e que então avança em direção ao molde. Na sequência do final do enchimento da cavidade, o pistão continua exercendo pressão sobre o metal líquido dentro cavidade, de forma a direcionar metal do biscuit em direção ao(s) produto(s), de forma a compensar a contração de resfriamento e solidificação do metal, reduzindo a tendência de formação de defeitos de porosidade de contração (rechupes). Esta manutenção da pressão, comumente conhecida como recalque ou compactação deve ser mantida até o final da solidificação do metal nos canais de ataques, instante, a partir do qual, perde-se o poder de atuação sobre os produtos. [2] Um esquema destas 3 etapas do processo pode ser observado na **Figura 3**.

Figura 3: Etapas do processo de injeção em alta pressão

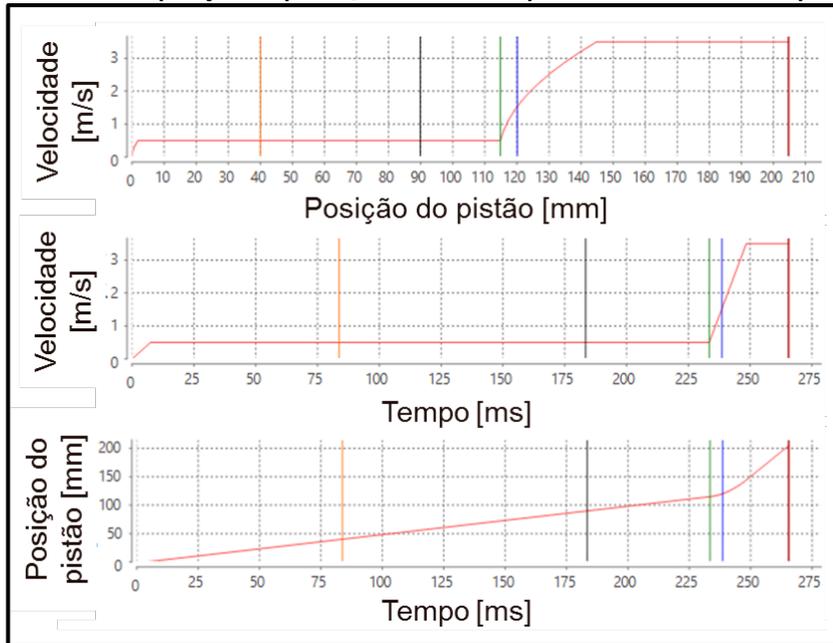


Fonte: Elaborado pelo Autor

1.2 Curva de injeção

Durante a etapa de injeção, a movimentação do pistão é controlada pela curva de injeção, a qual por sua vez é configurada na máquina injetora e é repetida a cada novo ciclo de produção. A curva de injeção é descrita por dois de 3 possíveis parâmetros – a posição do pistão (s), a velocidade do pistão (v) e o tempo (t). Com base em uma curva definida com 2 destes 3 parâmetros, é possível inferir o parâmetro remanescente. Uma mesma curva de injeção pode então ser exibida de 3 formas diferentes ($v \times s$; $v \times t$ e $s \times t$), conforme indicado na **Figura 4**.

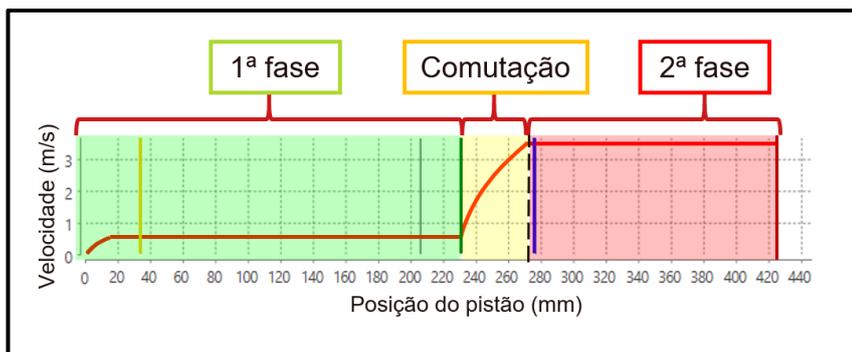
Figura 4: Exemplo de uma mesma curva de injeção descrita em função de diferentes combinações dos parâmetros de posição do pistão, velocidade do pistão e instante de tempo



Fonte: Elaborado pelo autor

A curva de injeção, dentre as 3 curvas indicadas e a mais comumente utilizada nas injetoras é a curva de velocidade por posição, sendo usualmente composta de 3 fases, conforme indicado na Figura 5, com a possibilidade de uma 4ª fase para as injetoras mais modernas:

Figura 5: As 3 principais fases de uma curva de injeção

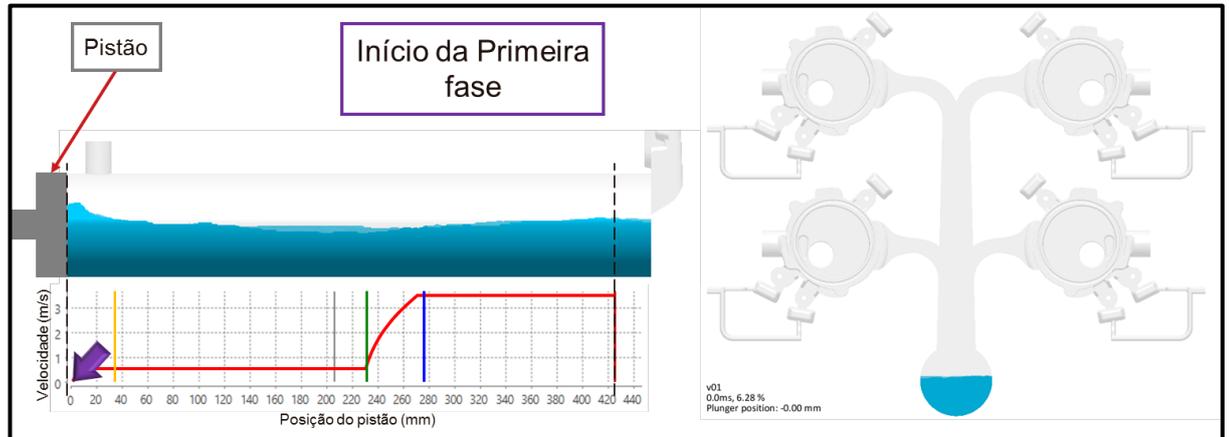


Fonte: Elaborado pelo Autor

a) Primeira fase

- Também conhecida como fase lenta, é a parte da curva responsável pelo encaminhamento do ar dentro da bucha para o interior da cavidade, objetivando a minimização do aprisionamento nessa região do sistema.
- Durante esta etapa da curva, a bucha de injeção encontra-se parcialmente preenchida de ar, conforme pode ser observado na Figura 6.
- Pode ser definida com base numa velocidade constante, ou em uma aceleração constante até uma velocidade de primeira fase final.

Figura 6: Instante de início da primeira fase. Neste instante, o pistão encontra-se completamente recuado

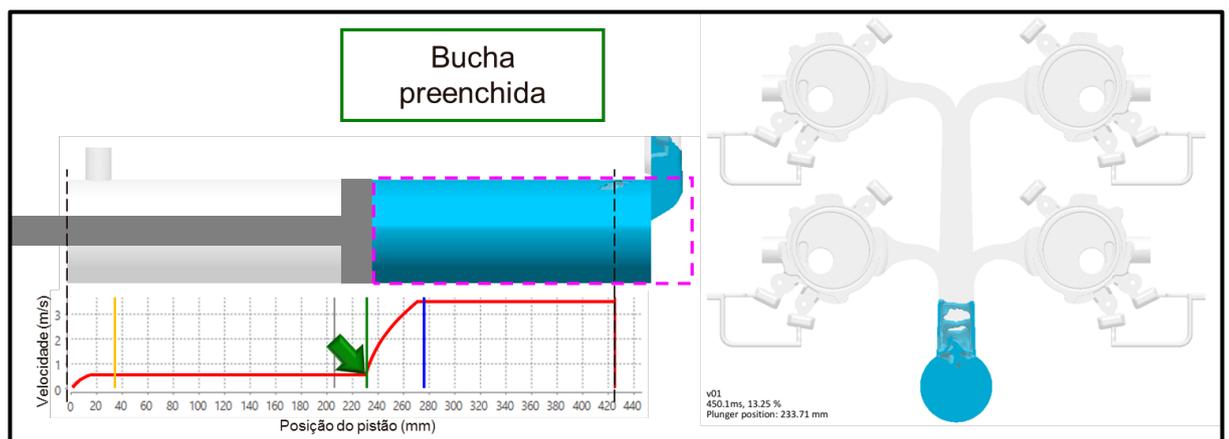


Fonte: Elaborado pelo Autor

b) Comutação

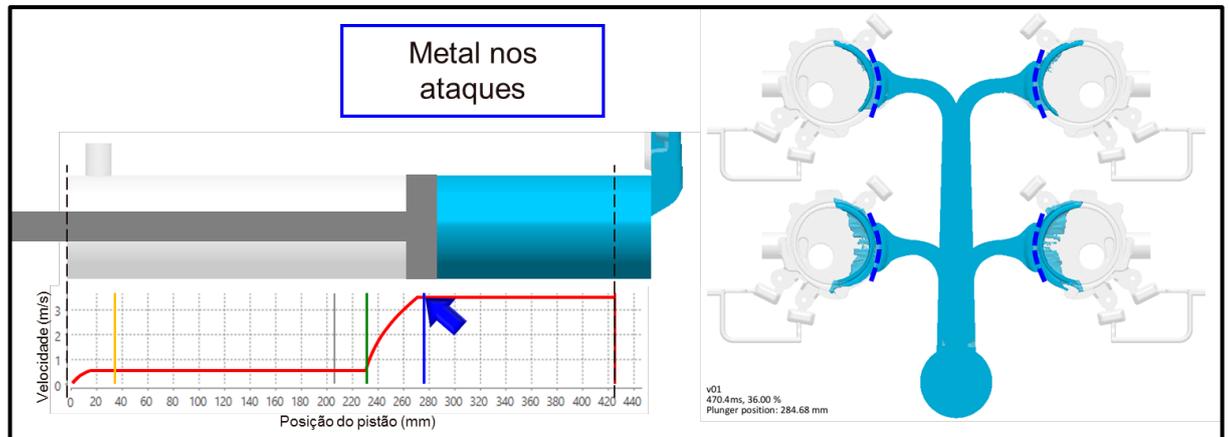
- Também conhecida como fase de aceleração, é responsável pela mudança entre a velocidade lenta e a velocidade rápida.
- Deve ser feita após o término do preenchimento da bucha, quando a mesma está totalmente preenchida de metal, conforme indicado na **Figura 7**.
- Deve terminar antes do metal atingir os produtos – instante indicado na **Figura 8** - de forma a minimizar a perda de temperatura do metal.
- A aceleração máxima que se pode ter é dependente do conjunto hidráulico da máquina injetora.

Figura 7: Instante do fim da primeira fase e início da comutação. Neste momento, toda a bucha de injeção está preenchida de metal, com todo o ar que preenchia a bucha tendo sido encaminhado para o interior da cavidade



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 8: Instante da curva no qual o metal atinge os ataques. A partir deste momento se inicia o enchimento dos produtos, que deve ser feito com a velocidade rápida para minimizar a perda de temperatura



Fonte: Elaborado pelo Autor

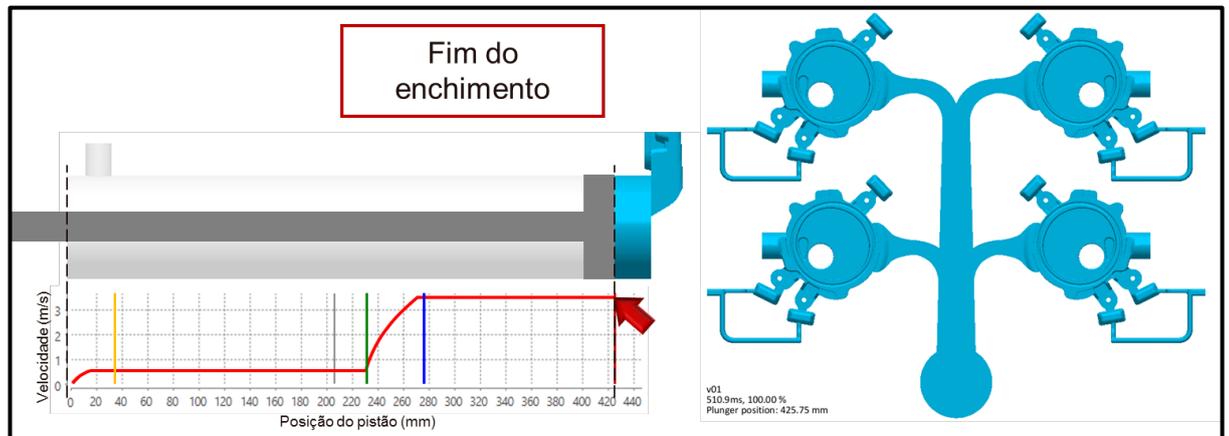
c) Segunda fase

- Também conhecida como fase rápida, é a parte da curva responsável pelo preenchimento dos produtos.
- A velocidade de 2ª fase deve ser elevada o suficiente para evitar perdas excessivas de temperatura, porém deve ser mantida o mais baixa o possível para minimizar a turbulência do enchimento. Velocidades de 2ª fase muito elevadas podem levar à erosão prematura da ferramenta.

d) Terceira fase

- Também conhecida como fase de desaceleração, é responsável por minimizar o impacto à ferramenta e máquina injetora que se tem com uma parada abrupta do pistão quando o mesmo atinge o final de seu possível curso ao final do enchimento de toda a cavidade, instante o qual pode ser observado na Figura 9. A desaceleração também facilita a extração do ar da cavidade pelos rebaiços posicionados nas bolsas, que comunicam a cavidade com o ambiente externo, pela redução da velocidade de saída de ar ao final do enchimento.
- A possibilidade de uso desta fase é dependente dos recursos presentes nas injetoras, algo mais comumente presente nas injetoras modernas

Figura 9: Instante final da curva de injeção. Neste momento, toda a cavidade encontra-se preenchida de metal e tem-se então o início da solidificação e atuação do recalque



Fonte: Elaborado pelo Autor

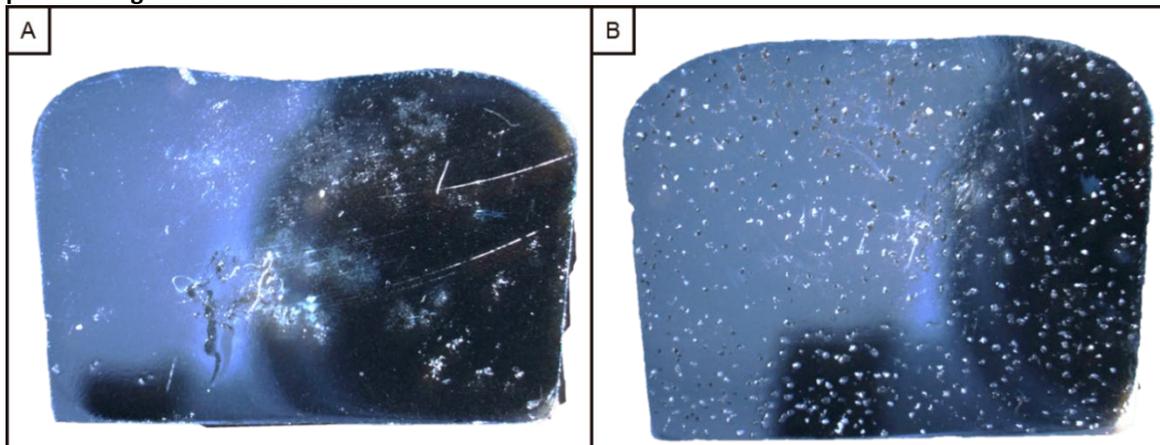
1.3 Problemas possíveis decorrentes da definição incorreta da velocidade de 1ª fase

O fluxo de metal durante a primeira fase da curva de injeção fica limitado ao interior da bucha, sendo que a definição incorreta da velocidade do pistão durante a mesma impacta diretamente em 2 fatores:

1. Perda de temperatura do metal
 - Perdas excessivas de temperatura aumentam a tendência de formação de defeitos de junta fria e de falhas de enchimento.
2. Aprisionamento de ar
 - O aprisionamento de ar no metal aumenta a tendência de formação de defeitos de bolhas de ar no fundido.

O ar incorporado no metal durante a primeira fase tem efeito similar de não se fazer o tratamento de degaseificação na liga, sendo algo que resulta na formação de bolhas de ar na peça fundida independentemente de se ter um bom projeto de sistema de canais e bolsas de ar, o qual só consegue reduzir o aprisionamento de ar durante a comutação e 2ª fase. Um exemplo de metal com ar incorporado levando à formação de bolhas de ar pode ser observado na **Figura 10**.

Figura 10: Corte transversal de corpos de prova de ensaio de pressão reduzida para avaliação da efetividade do tratamento de degaseificação em condições com tratamento (A) e sem tratamento (B) para uma liga de alumínio A356



Fonte: Elaborado pelo Autor

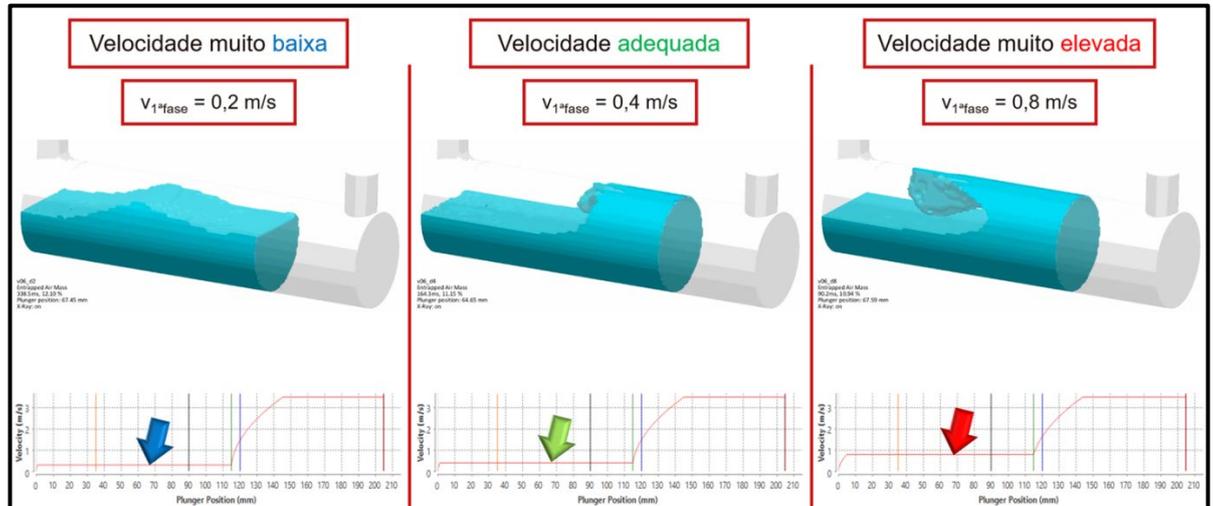
2 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE 1ª FASE

2.1 Mecanismo de formação de aprisionamento de ar na bucha de injeção

A perda de temperatura do metal durante a primeira fase depende de uma série de fatores além da velocidade de primeira fase, como as propriedades termofísicas da liga injetada, do material da bucha, das dimensões da bucha, da ciclagem térmica do ferramental, etc.

O aprisionamento de ar durante a primeira fase, por outro lado, depende de menos fatores, sendo dependente praticamente apenas do formato do fluxo de metal, o qual é resultante da velocidade de 1ª fase, das dimensões da bucha e do volume de metal dosado. A geometria relativamente simples das buchas de injeção no formato de um cilindro permite a geração de modelos científicos que objetivam a definição de uma velocidade de primeira fase que evite a formação de uma onda de metal, a qual resulta no isolamento de ar na parte atrás da bucha para velocidades baixas ou na parte da frente para velocidades muito elevadas, conforme pode ser observado na **Figura 11**.

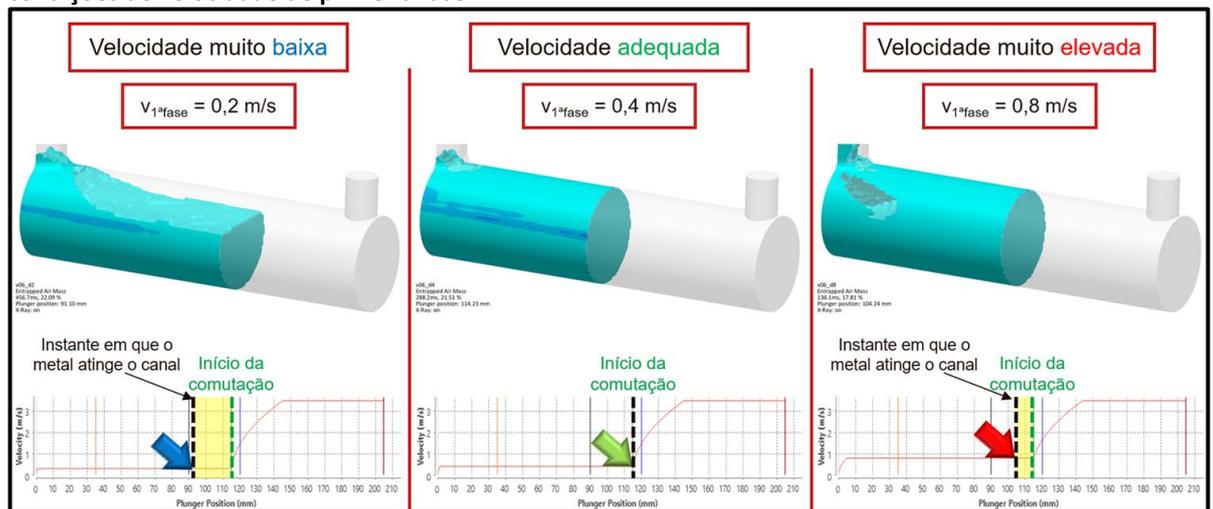
Figura 11: Exemplo do efeito de formação de ondas para velocidades de primeira fase muito baixas ou elevadas



Fonte: Elaborado pelo Autor

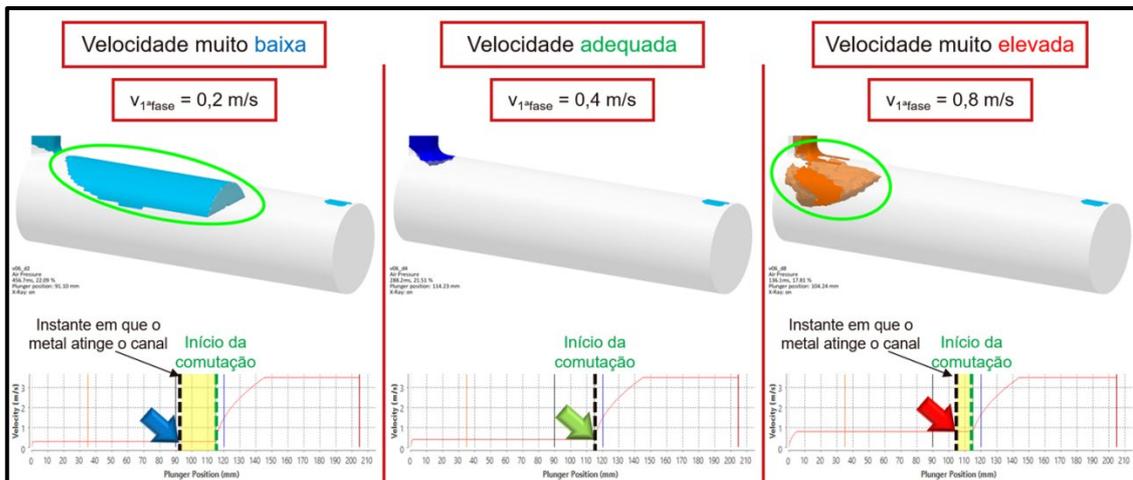
A definição correta da velocidade de 1ª fase faz com que todo o ar da bucha tenha sido direcionado para o interior da cavidade antes do metal começar a atingir o ataque. Em qualquer situação diferente desta se terá ar no interior da bucha sem comunicação com as saídas de ar da cavidade, levando ao aprisionamento dos bolsões de ar envolvidos por metal, conforme pode ser observado na **Figura 12** e na **Figura 13**.

Figura 12: Representação do instante em que o metal atinge o sistema de canais para diferentes condições de velocidade de primeira fase.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 13: Representação do instante em que o metal atinge o sistema de canais para diferentes condições de velocidade de primeira fase, com a visualização do ar no lugar do metal.



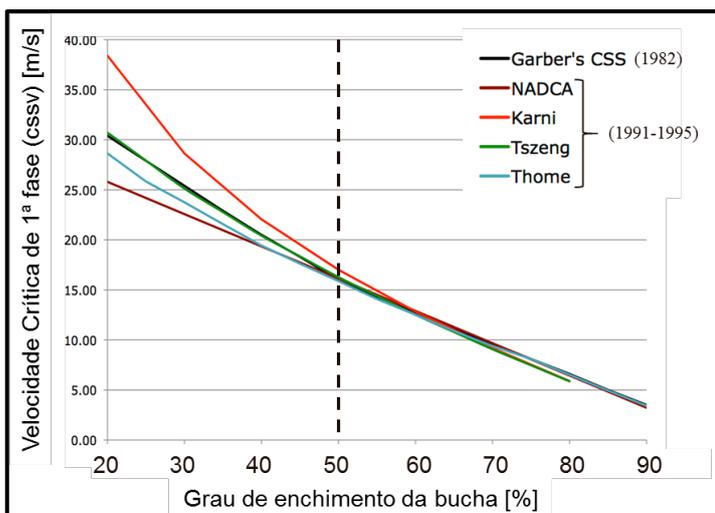
Fonte: Elaborado pelo Autor

2.2 Modelos teóricos para a definição da velocidade de segunda fase

Uma série de pesquisadores propuseram modelos teóricos para prever a velocidade de 1ª fase necessária para evitar o aprisionamento de ar decorrente da formação de ondas no interior da bucha de injeção, começando com o modelo proposto por Garber em 1982 [3], seguido pelos modelos de Karni [4], Tszeng [5], Thorme [6] e da NADCA (North America Die Casting Association) [7] publicados entre 1991 e 1995.

Este artigo não entrará em detalhe na forma como estes modelos foram desenvolvidos, porém conforme pode ser observado na Figura 14, os mesmos fornecem valores similares para condições de nível de enchimento da bucha de injeção acima de 50%.

Figura 14: Comparativo dos diferentes modelos de previsão da velocidade crítica de 1ª fase [7]



O modelo desenvolvido pela NADCA, que pode ser observado na equação (1) depende de apenas duas variáveis, o diâmetro da bucha de injeção e a fração de preenchimento da mesma, a qual pode ser calculada com a equação (2).

$$v_{cssv} = C * \frac{100\% - f_{bucha}}{100\%} * \sqrt{\varnothing_{bucha}} \quad (1)$$

Onde,

- v_{cssv} = velocidade crítica de 1ª fase (em m/s);
- C = constante igual a 3,633 m^{0,5}/s
- f_{bucha} = fração de preenchimento da bucha (em %)
- \varnothing_{bucha} = diâmetro da bucha de injeção (em m)

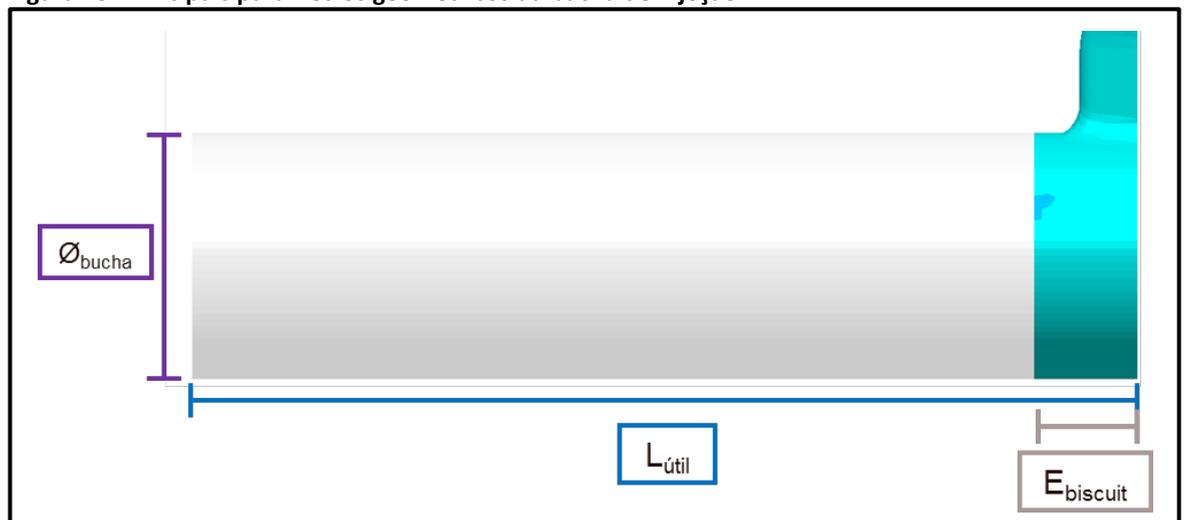
$$f_{bucha} = 100 * \frac{Vol_{galho}}{Vol_{total\ bucha}} = 100 * \frac{Vol_{galho}}{\pi * \varnothing_{bucha}^2 * L_{bucha} / 4} \quad (2)$$

Onde,

- f_{bucha} = fração de preenchimento da bucha (em %)
- Vol_{galho} = volume total do galho (produtos + sistema de fundição)
- $Vol_{total\ bucha}$ = volume útil da bucha de injeção
- \varnothing_{bucha} = diâmetro da bucha de injeção (em m)
- L_{bucha} = comprimento útil da bucha

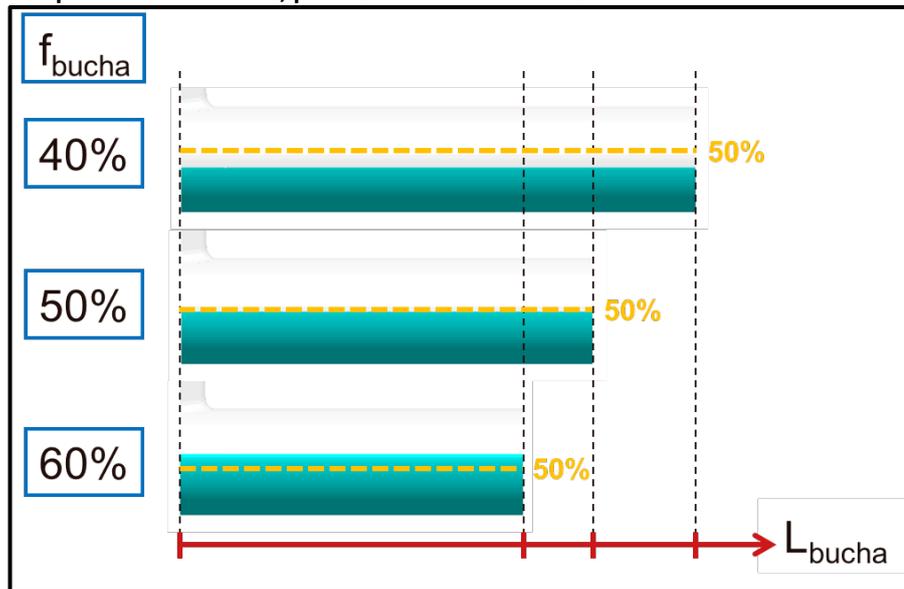
Um esquema com os principais parâmetros geométricos da bucha pode ser observado na figura 15, e um exemplo de diferentes condições de nível de enchimento da bucha segue indicado na Figura 16.

Figura 15: Principais parâmetros geométricos da bucha de injeção



Fonte: Elaborado pelo Autor

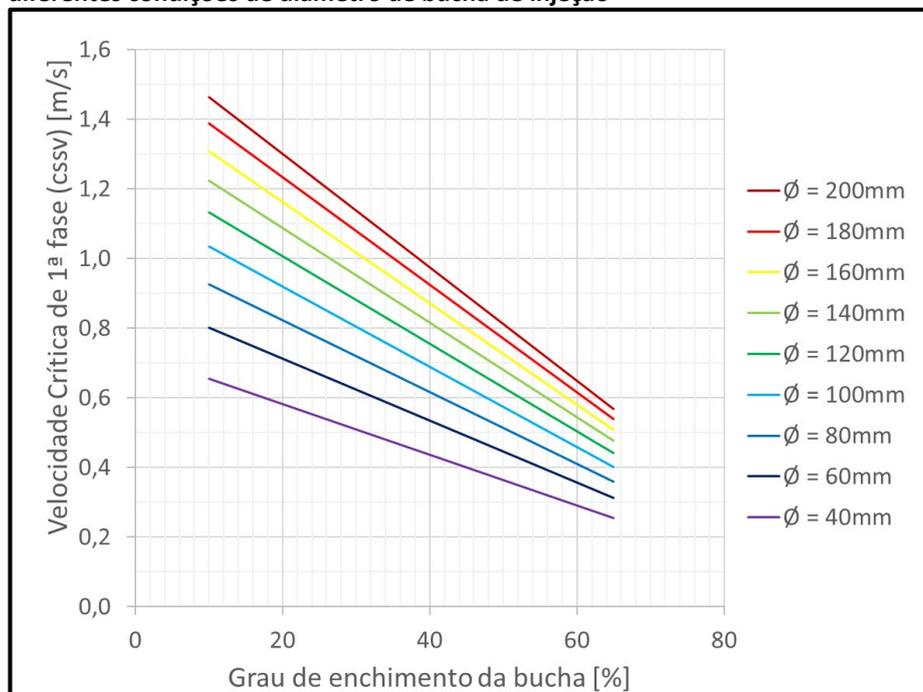
Figura 16: Diferentes condições de nível de enchimento de bucha resultantes da variação do comprimento da mesma, para um mesmo volume de metal dosado



Fonte: Elaborado pelo Autor

Dado que o modelo da NADCA depende apenas de duas variáveis, é possível construir um ábaco contendo diferentes condições de diâmetro de bucha, conforme pode ser observado na Figura 17.

Figura 17: Ábaco de cálculo de velocidade da primeira fase baseado no modelo da NADCA, para diferentes condições de diâmetro de bucha de injeção



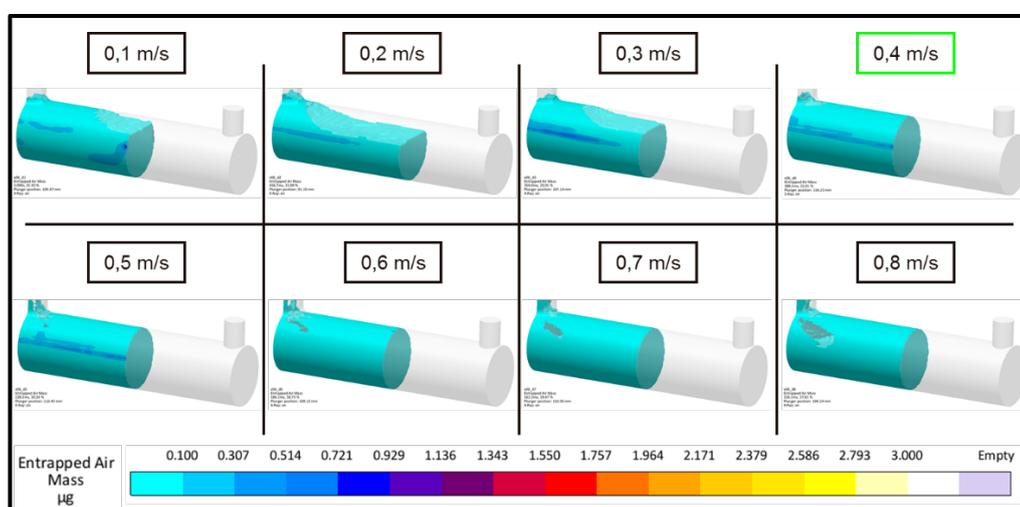
Fonte: Elaborado pelo autor, com base no modelo da NADCA [7]

Conforme pode ser observado na Figura 17, no modelo da NADCA, maiores níveis de preenchimento da bucha reduzem a velocidade de 1ª fase necessária, enquanto que maiores diâmetros requerem velocidades mais elevadas.

2.3 Determinação da velocidade de primeira fase via simulação numérica de fundição

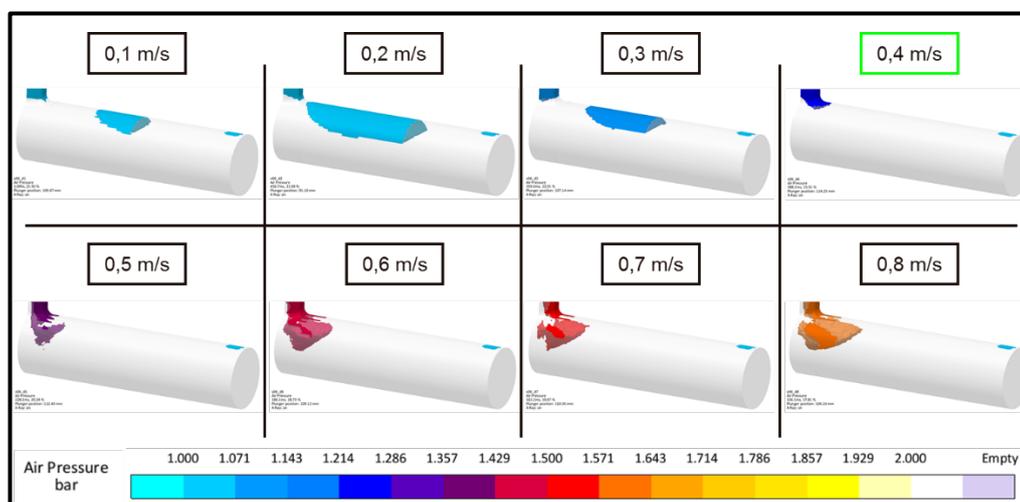
Fazendo uso do software de simulação numérica de fundição MAGMASOFT®, é possível simular diferentes condições de velocidade de primeira fase para um dado sistema e então comparar os resultados obtidos para então definir a velocidade de 1ª fase que minimiza o isolamento de ar na bucha, condição na qual não há ar isolado na bucha no instante em que o metal primeiro atinge o sistema de canais. Um exemplo deste tipo de análise pode ser observado na Figura 18 e na Figura 19, no qual a velocidade de primeira fase de 0,4m/s é a que minimiza o isolamento de ar no interior da bucha.

Figura 18: Instante em que o metal atinge o sistema de canais para diferentes condições de velocidade de primeira fase num sistema com $\varnothing_{\text{bucha}} = 60\text{mm}$ e $f_{\text{bucha}} = 50\%$.



Fonte: Elaborado pelo Autor

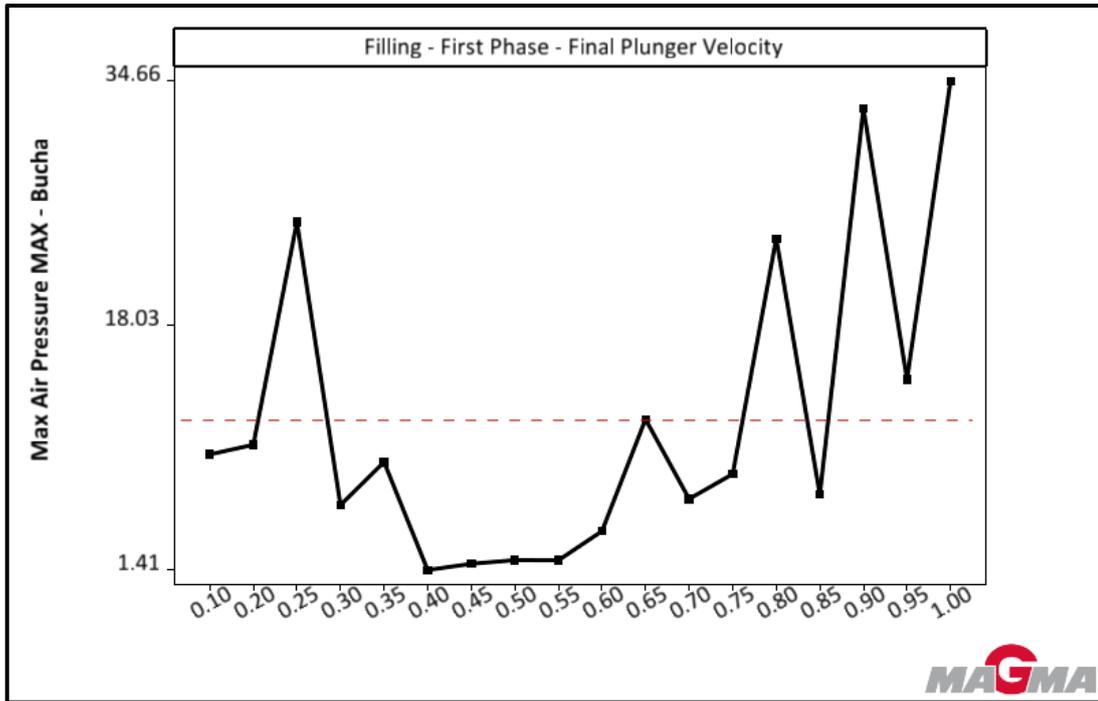
Figura 19: Instante em que o metal atinge o sistema de canais para diferentes condições de velocidade de primeira fase num sistema com $\varnothing_{\text{bucha}} = 60\text{mm}$ e $f_{\text{bucha}} = 50\%$, com a visualização do ar no lugar do metal.



Fonte: Elaborado pelo Autor

A análise dos resultados 3D de diferentes condições se torna algo laborioso para um comparativo com muitos designs. Utilizando a ferramenta de avaliação do MAGMASOFT®, é possível traduzir os resultados 3D na forma de gráficos e tabelas, conforme pode ser observado na Figura 20.

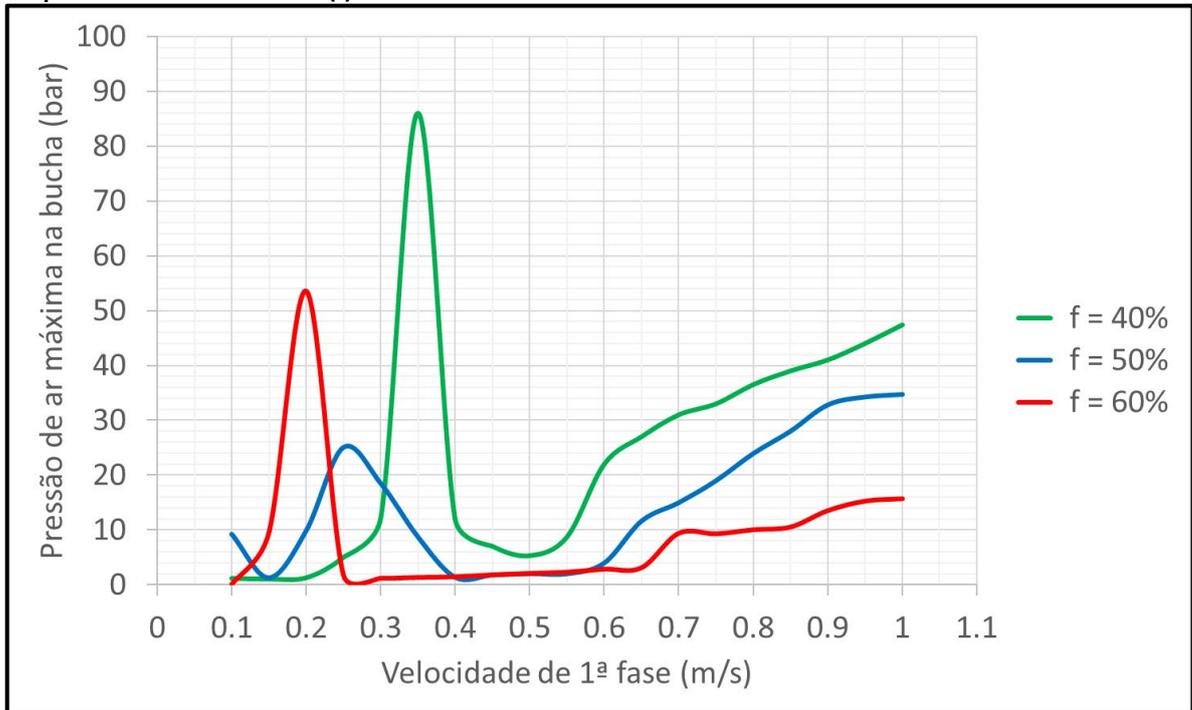
Figura 20: Gráfico de efeitos principais gerado na perspectiva de avaliação do MAGMASOFT® indicando o efeito da velocidade de 1ª fase sobre a pressão de ar máxima desenvolvida na bucha de injeção para um sistema com $\varnothing_{\text{bucha}} = 60\text{mm}$ e $f_{\text{bucha}} = 50\%$.



Fonte: Elaborado pelo Autor

O experimento acima foi repetido mantendo o diâmetro da bucha constante e variando o comprimento da mesma de forma a se ter condições de f_{bucha} de 40% e 60%. Os resultados das 3 condições de nível de preenchimento da bucha foram exportados e plotados num único gráfico com curvas suavizadas, o qual pode ser visualizado na Figura 21.

Figura 21: Gráfico de efeitos principais indicando a velocidade de 1ª fase versus a pressão de ar máxima desenvolvida na bucha de injeção para sistemas com $\varnothing_{\text{bucha}} = 60\text{mm}$ e diferentes níveis de preenchimento da bucha (f)



Fonte: Elaborado pelo Autor

O gráfico da Figura 21 permite observar que para todas as condições estudadas há uma faixa ótima de velocidades de 1ª fase na qual a pressão de ar máxima na bucha e, conseqüentemente, o isolamento de ar no interior da mesma são minimizados. Antes e após essa faixa ótima se observam aumentos da tendência de isolamento de ar.

Outro fenômeno que pode ser observado é que para velocidades de 1ª fase extremamente baixas, o isolamento de ar na bucha também é minimizado. A análise mais detalhada dos resultados 3D das simulações para estas velocidades reduzidas revelou que esse comportamento ocorre em virtude de enchimento extremamente lento da bucha, que permite com que a onda de metal formada no início da primeira fase se dissipe antes do término da mesma. Destaca-se, entretanto, que estas baixas velocidades de 1ª fase intensificam significativamente a perda de temperatura do metal, não sendo viáveis de aplicação na prática.

As faixas de velocidade de 1ª fase ótimas obtidas nos experimentos realizados via simulação numérica, assim como as velocidades previstas pelo modelo da NADCA seguem indicadas na Tabela 1. A mesma permite concluir que o modelo da NADCA oferece uma boa aproximação da velocidade de 1ª fase, na medida em que as velocidades previstas sempre ficaram dentro das faixas ótimas obtidas via simulação. O tamanho da faixa ótima de velocidades diminui com a redução do nível de preenchimento da bucha, indicando que estas condições apresentam uma janela de processo mais estreita.

Tabela 1: Comparativo dos resultados obtidos via simulação numérica de fundição com a velocidade prevista pelo modelo da NADCA para um sistema de $\varnothing_{\text{bucha}} = 60\text{mm}$

f_{bucha} (%)	v1ª fase prevista pelo modelo da NADCA (m/s)	v1ª fase mínima obtida via simulação (m/s)	v1ª fase máxima obtida via simulação (m/s)	Variação percentual máxima entre modelo e simulação	Δv da faixa ótima (m/s)
40	0,53	0,40	0,53	-24,5%	0,13
50	0,45	0,40	0,60	+33,3%	0,20
60	0,35	0,25	0,65	-28,6%	0,40

Fonte: Elaborado pelo Autor

2.4 Limitações dos modelos teóricos

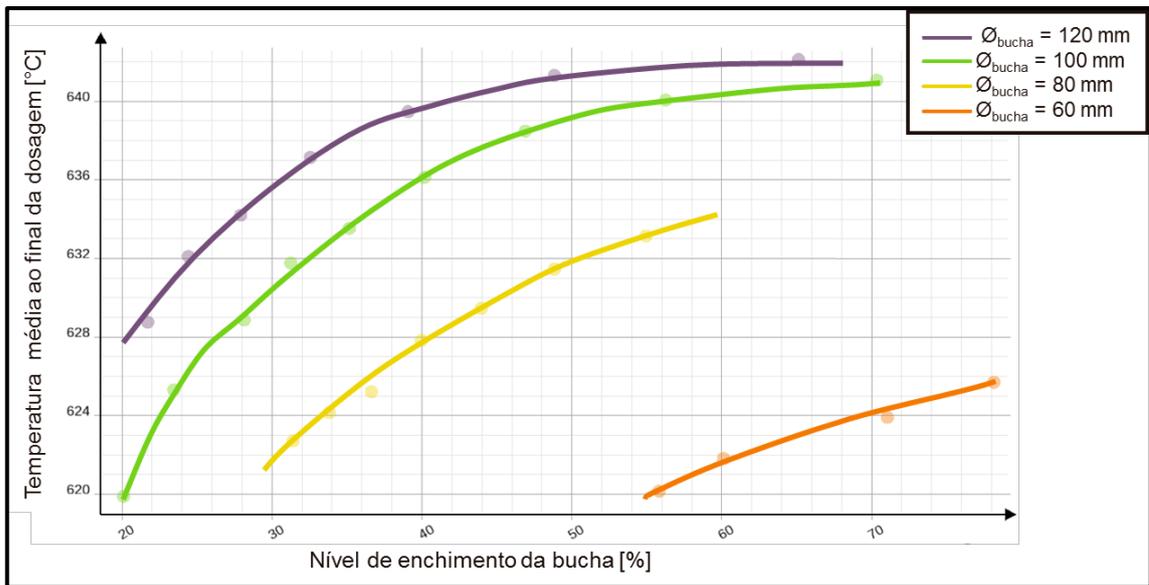
Ainda que os modelos teóricos tenham se mostrado capazes de prever uma velocidade de 1ª fase que minimiza o aprisionamento de ar na bucha de injeção, os mesmos apresentam algumas limitações que podem fazer com os mesmos não sejam suficientes para atender todas as situações da prática.

2.4.1 Perda de temperatura

Conforme mencionado anteriormente, a perda de temperatura do metal durante a primeira fase depende de uma série de fatores além da velocidade de primeira fase, as quais não são consideradas nos modelos que se preocupam apenas com o formato do fluxo para reduzir o aprisionamento de ar no interior da bucha. A consideração de todos os fatores necessários para se ter uma previsão assertiva da perda de temperatura do metal apresenta elevada complexidade, somente sendo possível de ser feita de forma assertiva via simulação numérica.

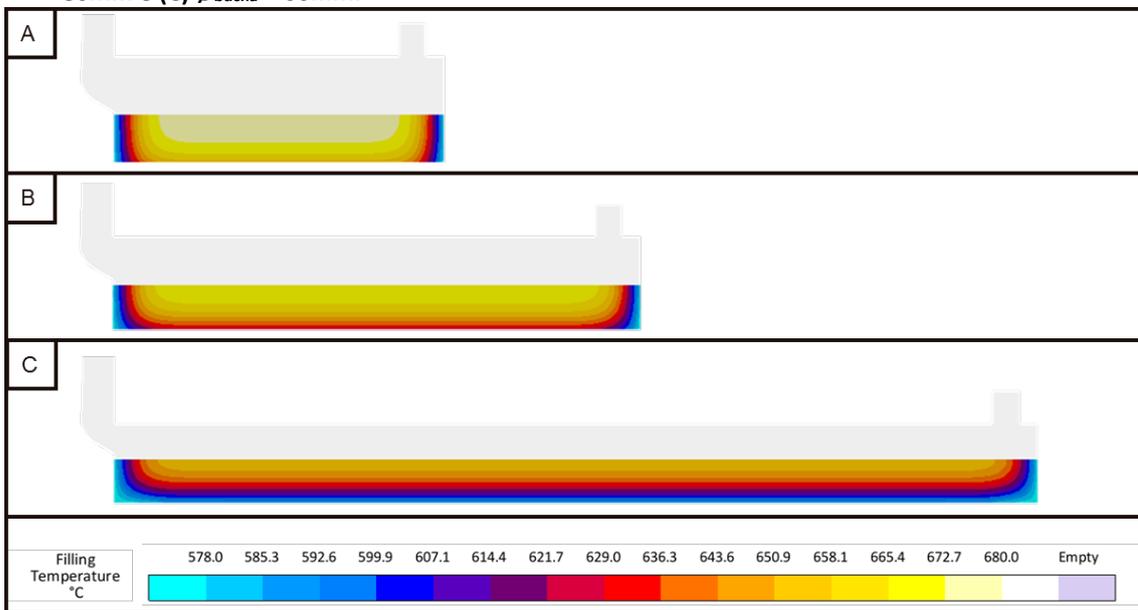
Conforme pode ser observado na equação 2, é possível obter um mesmo nível de preenchimento de bucha para diferentes condições de diâmetro e comprimento da mesma. Para um mesmo valor de f_{bucha} , uma condição com maior relação $L_{\text{bucha}}:\varnothing_{\text{bucha}}$ resultará numa maior perda de temperatura, na medida em que se tem um aumento da área de contato do metal líquido com as paredes da bucha de injeção. De forma análoga, para um mesmo $\varnothing_{\text{bucha}}$, o aumento de f_{bucha} diminui a perda de temperatura durante a dosagem. Estes efeitos podem ser visualizados na **Figura 22** e na **Figura 23**, que comparam a temperatura do metal no interior da bucha logo antes do início da primeira fase para 3 sistemas com $f_{\text{bucha}} = 56\%$ e diferentes diâmetros de bucha: (A) $\varnothing_{\text{bucha}} = 100\text{mm}$, (B) $\varnothing_{\text{bucha}} = 80\text{mm}$ e (C) $\varnothing_{\text{bucha}} = 60\text{mm}$. Observa-se que a simulação da dosagem destes sistemas considera uma condição simplificada na qual o preenchimento da bucha é feito de forma instantânea de forma a eliminar os efeitos do tempo e forma da dosagem e manter apenas o efeito da geometria da bucha.

Figura 22: Efeito do nível de enchimento da bucha sobre a perda de temperatura do metal durante a dosagem para diferentes condições de $\varnothing_{\text{bucha}}$ num sistema de massa total de 2,8kg.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 23: Comparativo da temperatura do metal no interior da bucha logo antes do início da primeira fase para 3 sistemas com $f_{\text{bucha}} = 56\%$, com diferentes diâmetros de bucha: (A) $\varnothing_{\text{bucha}} = 100\text{mm}$, (B) $\varnothing_{\text{bucha}} = 80\text{mm}$ e (C) $\varnothing_{\text{bucha}} = 60\text{mm}$.

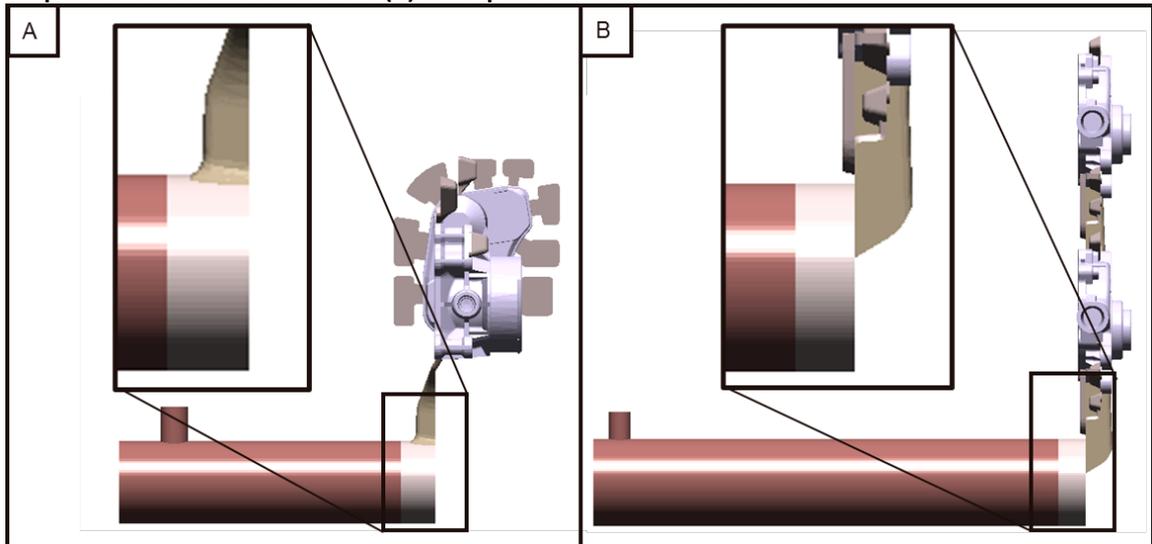


Fonte: Elaborado pelo Autor

2.4.2 Posição do canal em relação à bucha

Outra limitação dos modelos teóricos é a posição do canal em relação à bucha. Todos os modelos teóricos consideram um sistema de canais posicionado acima da bucha de injeção, enquanto que, na indústria de fundição, é comum se ter o canal posicionado na frente da bucha, conforme pode ser visualizado na Figura 24.

Figura 24: Exemplos de sistemas com diferentes posições do canal em relação à bucha:> (A) canal posicionado acima da bucha e (B) canal posicionado na frente da bucha.



Fonte: Elaborado pelo Autor

O posicionamento do canal na frente da bucha de injeção tem efeito similar a uma redução do nível de preenchimento da bucha, de forma que a velocidade de primeira fase necessária para evitar o aprisionamento de ar passa a ser mais alta do que o que é previsto nos modelos. Devido à complexidade adicional que se tem em situações desse tipo, a simulação numérica acaba sendo a única forma de se prever de forma assertiva a velocidade de 1ª fase a ser utilizada, sem que seja necessário a realização de testes práticos.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos teóricos de cálculo da velocidade de primeira fase oferecem uma boa aproximação com a realidade para o aspecto de aprisionamento de ar no interior da bucha. Enquanto que os modelos teóricos fornecem um único valor de velocidade, com a simulação numérica de fundição é possível obter uma faixa ótima de trabalho, a qual é reduzida com a diminuição do nível de preenchimento da bucha.

Os modelos da literatura apresentam limitações, com destaque para o fato de que os mesmos não consideram a perda de temperatura do metal durante a primeira fase, fenômeno que por depender de uma quantidade grande de fatores deve ser avaliado com base em simulações. Uma fundição sem o recurso de simulação deve procurar utilizar velocidades iguais ou superiores às previstas via modelo teórico, dado que a queda de temperatura do metal é reduzida com o aumento da velocidade de 1ª fase.

4 REFERÊNCIAS

1. LÓPEZ, J. Shot Sleeve Wave Dynamics in the Slow Phase of Die Casting Injection. **Journal of Fluids Engineering**, Madrid, Journal of Fluids Engineering, Junho 2000. 349-356.
2. CAMPBELL, J. **Complete Casting Handbook**. 2nd. ed. Oxford: Elsevier, 2015.
3. GARBER, L. W. Theoretical Analysis and Experimental Observation of Air Entrapment During Cold Chamber Filling. **Die Casting Engineer**, 1982. 14-22.
4. KARNI, Y. . B. J. . C. Y. . A. A. T. . D. M. **Minimization of Air Entrapment in the Shot Sleeve of a Die Casting Machine to Reduce Porosity**. The Ohio State University. Columbus. 1991. (ERC/NSM-C-91-31).
5. TSZENG, T. C. . A. C. Y. L. A Study of Wave Formation in Shot Sleeve of a Die Casting Machine. **ASME J. Eng. Ind**, 1994. 175–182.
6. THOME, M. C. . A. B. J. R. Optimal Slow Shot Velocity Profiles for Cold Chamber Die Casting. **NADCA Congress and Exposition**, Indianapolis, 1995.
7. NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION. Comparing the Critical Slow Shot Velocity Calculations. **https://www.diecasting.org/**, 2019. Disponível em: <<https://www.diecasting.org/iParts/Common/ContentBlock/PostDefault.aspx?iUniformKey=ce7c1e68-a999-4428-ac83-4b4ba0e734b7&ReplyOptions=a2354a56-c5c3-4f68-8955-0b1e3f497e3c&TagKeys=695c971c-7ab8-43f7-b6c5-7bf7a7717c0b&DefaultHtmlSessionKey=bcb08659-23d9-4ecf>>. Acesso em: 30 Maio 2019.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial à MAGMA Engenharia do Brasil pelo suporte e disponibilização de recursos para o desenvolvimento desse trabalho.

6 SOBRE OS AUTORES

¹ Felipe Cebukin (Aluno)



Possui graduação em Engenharia de materiais pela Faculdade Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) (2015) e pós-graduação em Engenharia de Fundição pela Faculdade SENAI de Tecnologia em Processos Metalúrgicos (2020). Tem experiência na área de Engenharia Metalúrgica, com ênfase na área de fundição de metais. É engenheiro de projetos na empresa MAGMA Engenharia do Brasil Ltda.

² Marcelo Lopes da Silva (Orientador)



Bacharel em Desenho Industrial – Projeto de Produto (2007), Licenciatura Plena (Programa Especial de Formação Pedagógica para Formadores da Educação Profissional (2008), Pós-graduação em docência do ensino superior (2014) e mestrando em tecnologia nuclear – materiais (conclusão - previsto 2021). Atualmente é professor da Escola e Faculdade SENAI Nadir Dias de Figueiredo lecionando disciplinas nos Cursos Técnicos de Metalurgia, Tecnologia em Processos Metalúrgicos e Pós-Graduação em Engenharia de Fundição e Soldagem.

³ Odilon de Moraes Junior (Orientador)



Possui graduação em Engenharia Metalúrgica pela Escola de Engenharia Mauá (1976) e Mestrado em Tecnologia Nuclear de Materiais pelo Instituto de Pesquisas Nucleares – IPEN – SP (2018). É Pós-Graduado com MBA em Gestão Empresarial pela FGV (2001). Atualmente é professor da Escola e Faculdade SENAI Nadir Dias de Figueiredo lecionando disciplinas nos Cursos Técnicos de Metalurgia, Tecnologia em Processos Metalúrgicos e Pós-Graduação em Engenharia de Fundição e Soldagem.