

# Estudo do Comportamento da Porosidade Via Simulação Numérica para Produtos Injetados em Alumínio Sob Pressão SENAFOR / Brazil

Concer D <sup>(1)</sup>  
Marcondes P. V. P. <sup>(2)</sup>

## RESUMO

A porosidade resultante do processo de injeção de alumínio sob pressão corresponde a 70% da falha desse processo. A determinação da origem dos poros e definição dos mecanismos de solução é complexa, assim é comum se empregar alternativas de processo e de engenharia para tentar resolver o problema. Diante de tal complexidade, procurou-se resolver os seguintes problemas: como aplicar simulações para minimizar a ocorrência de poros em produtos injetados em alumínio? Como desenvolver uma equação que represente o comportamento e a origem da porosidade? Para estudar a origem e o comportamento de poros foram analisadas condições de projeto e parâmetros do processo *HPDC* “*High Pressure Die Casting*”.

**Keywords:** alumínio; porosidade; moldes para injeção; simulação.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de injeção sob pressão responde por 70% do mercado de produtos em alumínio, destaca-se a indústria automotiva como a maior consumidora de produtos obtidos através desse processo. Apesar de que o processo estudado ofereça inúmeras vantagens, os produtos obtidos através do processo sob pressão encontram limitações de aplicações devido à porosidade. Tais limitações se caracterizam por falhas estéticas, redução da resistência estrutural decorrente das perdas volumétricas. As soluções dos problemas derivados dos poros são complexa isso porque os parâmetros do processo de injeção normalmente são definidas através de soluções práticas já consolidadas, amostragem ou tentativa e erro.

O interesse na metalurgia do alumínio, bem como a preocupação com a porosidade em produtos injetados em alumínio sob pressão foi renovada na década de 1990. Tal fato ocorreu quando mancais de eixo de comando foram produzidos pela primeira vez para a General Motors e DaimlerChrysler através da injeção sob pressão. A fabricação desses produtos, ultrapassam 100.000.000 de unidades por ano, isso para um único motor (STEEDMAN *et al.*, 2012).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

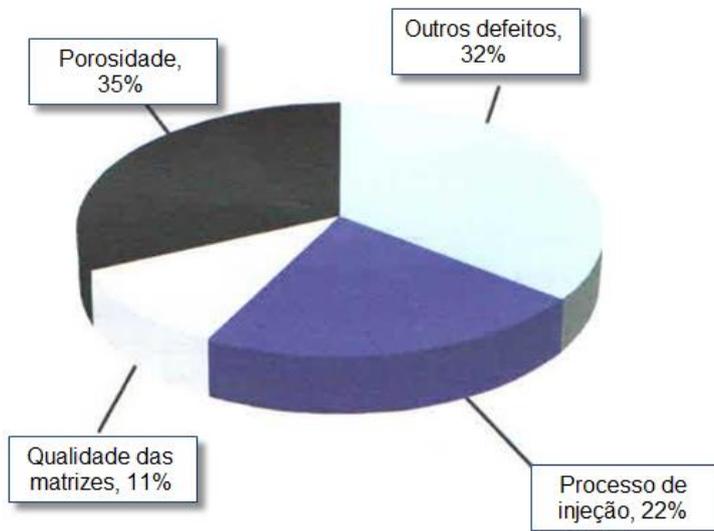
A porosidade é definida como a falha de preenchimento que se formaram durante o preenchimento de um produto através do processo de injeção sob pressão, é considerada o defeito mais frequente, quando comparado ao processo de injeção por gravidade e baixa pressão. Este defeito reduz as propriedades mecânicas do produto, como a tensão de escoamento e a tensão de ruptura. Conseqüentemente, a porosidade é considerada, como a principal causa de rejeição de componentes injetados através do processo *HPDC*. Há dois principais fatores que contribuem para a formação de porosidade na solidificação das ligas de alumínio. O primeiro é a contração resultante da variação volumétrica durante a solidificação, enquanto o segundo é o aprisionamento de gás, durante o fluxo de injeção (AMMAR *et al.*, 2008).

Entender o comportamento da porosidade é difícil, devido à carência de informações do processo *HPDC*, além da diversidade de opções de parâmetros de injeção possíveis durante a injeção. A combinação, da complexidade do processo e, da presença de gradientes de temperatura presentes em uma matriz para injeção através do processo *HPDC*, faz com que as simulações

computacionais nem sempre representam o comportamento da injeção de forma conclusiva (MILLER, 2010).

Sabe-se que 35%, são o percentual de defeito que a porosidade representa em produtos obtidos através do processo *HPDC*. A porosidade é o problema mais frequente presente no processo *HPDC* (NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, 2011). A representação esquemática, da distribuição de falhas derivadas do processo *HPDC* está ilustrada na figura 1.

**FIGURA 1:** Distribuição dos problemas de produtos injetados em alumínio no processo *HPDC* (NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, 2011).



A porosidade está presente na maioria dos produtos injetados em alumínio através do processo *HPDC*, porém é a classificação da porosidade, que aprova o produto para uma determinada aplicação. O problema é mais evidente em produtos usinados e em produtos estanques, quando há produtos reprovados pela presença de porosidade, poderão resultar em prejuízos com valores expressivos (NADCA, 2011).

Produtos com porosidade quando injetado através do processo *HPDC*, tem maior probabilidade de trincas no decorrer do seu ciclo de vida. Portanto, é a principal responsável pela redução da vida à fadiga, sendo que 90% de todas as amostras examinadas com porosidade tendem a fraturar, devido à falha microestrutural. Sendo assim a resistência à fadiga diminui à medida que o tamanho dos poros aumenta, e vice-versa (AMMAR *et al.*, 2008).

A porosidade pode estar presente já nos lingotes de alumínio, quando submetidos a uma intensa carga de cisalhamento, poderão ter seus filmes de óxido dissipados quando refundido e injetado, podendo atuar como centros de nucleação e reduzindo o tamanho de grão. Essa é uma opção eficiente, se o objetivo for o refino de grãos do alumínio. Quando se tem grãos de alumínio refinados, diminui-se a probabilidade de filmes de óxido durante o processo de injeção, que são considerados prejudiciais ao produto final, pois pode resultar na formação de porosidade (ZUO *et al.*, 2010).

O comportamento da porosidade também foi estudado através da queda de pressão de diferentes espumas de alumínio, quando inseridas em um túnel de vento. As medições foram realizadas utilizando o ar como fluido de arrefecimento, as espumas apresentaram poros com tamanho variando entre 0,906 a 0,970mm de diâmetro. Os resultados experimentais mostraram que a permeabilidade aumenta com o diâmetro dos poros, enquanto que o coeficiente de inércia depende apenas da porosidade (MANCIN *et al.*, 2012).

A porosidade gerada através do processo *HPDC* tem sido sempre um problema constante. A necessidade de design inovador, bem como a necessidade estrutural cada vez maior de produtos injetados em alumínio, exigidas pela indústria, ficou praticamente impossível ter produtos sem porosidade. Felizmente há recursos práticos na injetora, que permitem minimizar o volume de poros. A formação da porosidade em ligas de alumínio é de grande interesse para a indústria e para o segmento acadêmico, pois sua presença causa redução das propriedades mecânicas dos produtos obtidos a partir desse processo, mas também compromete a qualidade acabamento superficial. Estudos têm comprovado que a porosidade é um fenômeno complexo, e que o seu volume final,

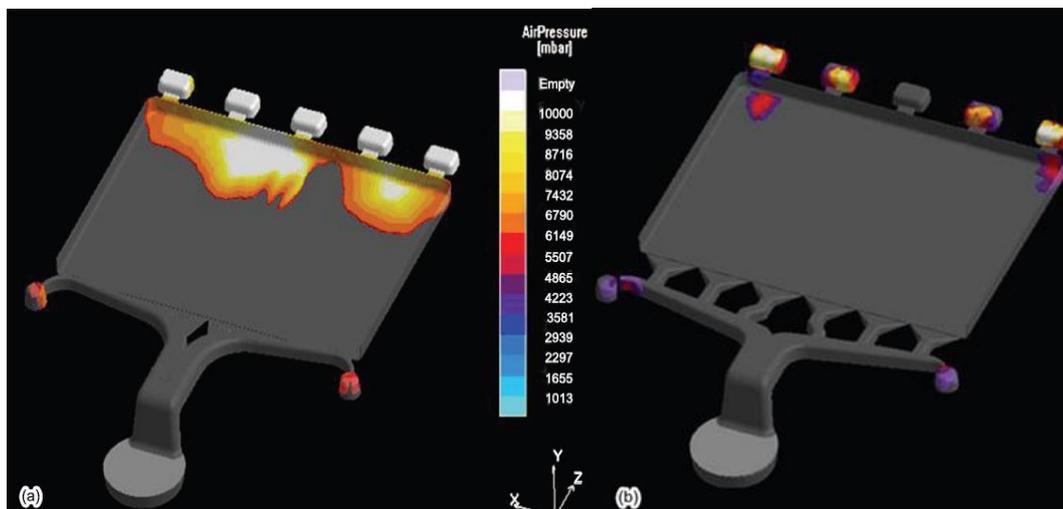
tamanho e distribuição é determinada por vários parâmetros do processo de injeção (TSOUKALAS, 2008).

A maior probabilidade de surgimento de porosidade ocorre em volumes que apresentam um maior percentual de fração líquida e não há material sólido para a restrição da formação da porosidade. Independente do percentual de concentração de hidrogênio no alumínio injetado, provavelmente surgirá porosidade (KIRKMAN, 2006).

Quanto mais volume de porosidade, menor será a densidade do produto, devido aos vazios que ocupam o volume total da peça injetada, resultando em possíveis concentradores de tensões, e conseqüentemente, aumentando a probabilidade de fissuras e fraturas. Além disso, com base em princípios do mecanismo de fratura, o tamanho dos poros é tão importante como a quantidade total de porosidade (AMINUL *et al.*, 2011).

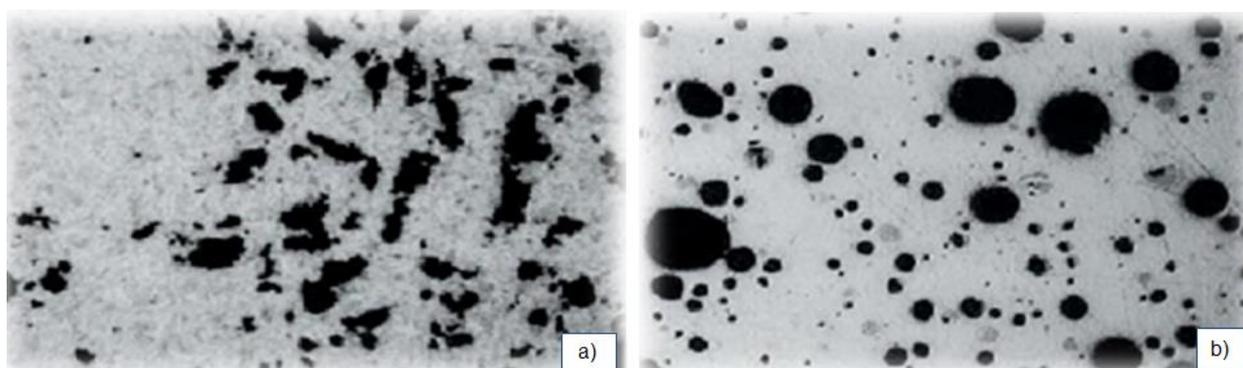
O surgimento da porosidade, não pode é um problema estrutural do molde e sim, um possível problema de projeto do canal de alimentação, ou um problema conceitual do próprio produto, como a concentração de massa, ou também possíveis erros de processos *HPDC*. Na figura 2a), é possível verificar através de simulações, a influência da geometria dos canais de alimentação durante o preenchimento de uma cavidade de um molde. Na figura 2b), têm-se uma nova proposta de canal, é possível observar que se alterando o a trajetória do fluxo de injeção, altera-se também a variação de pressão dentro da cavidade (KIM *et al.*, 2008).

**FIGURA 2:** Aprisionamento de ar variando com a geometria do canal de alimentação (KIM *et al.*, 2008); a) Canal de ataque tipo leque; b) Canal de ataque com múltiplas entradas



A figura 3 apresenta o comportamento e o formato dos poros (KIRKMAN, 2006). Na figura 3(a) tem-se o poro com geometria irregular, definida como porosidade por contração, derivada na solidificação. Já na figura 3(b), o poro apresenta geometria circular, definida como porosidade por ar preso, derivado do fluxo de injeção.

**FIGURA 3:** Tipos de poros e suas origens. a) Poro gerado na solidificação (KIRKMAN, 2006). a) Poro gerado por ar preso durante o fluxo de injeção. b) Poro gerado por ar preso durante o fluxo de injeção.



O tamanho e quantidade de poros interferem diretamente nas propriedades mecânicas do produto obtido no processo *HPDC*. Normalmente, a porosidade é gerada inicialmente durante contração do alumínio dentro do molde, durante a solidificação ou ainda pelo aprisionamento de ar levado para a cavidade durante o fluxo de injeção (HANGAI *et al.*, 2008).

Existem diversas causas que representam a origem e o comportamento da porosidade, derivados do processo *HPDC*. Entre elas pode-se citar o perfil da camada limite do fluxo de injeção, projeto da matriz, ar preso, saídas de ar, canais de alimentação, comportamento da solidificação, lubrificante no pistão da bucha de injeção e quantidade e formação de vapor de água durante o processo (KHAN *et al.*, 2011).

Segundo (VINARCIK, 2002), o percentual de porosidade total é descrito pelo somatório de poros durante a solidificação somada com a quantidade de poros gerados pelo ar preso. Ou ainda, de uma forma mais detalhada, o percentual de porosidade pode ser representado pela seguinte equação:

$$\%P = \frac{\beta V^*}{V_c} + \left( \alpha \frac{T\rho L}{(237K)P} \right) (v - v^*) \quad (1)$$

Onde:

$\%P$  é o percentual de porosidade;

$\beta$  é o fator de contração durante a solidificação em porcentagem;

$V^*$  é o volume de alumínio injetado em  $\text{cm}^3$ ;

$V_c$  é o volume da cavidade em  $\text{cm}^3$ ;

$\alpha$  é a fração do gás que não se apresenta para a solidificação encolhimento poros;

$T$  é a temperatura do gás na cavidade fundição em graus Kelvin;

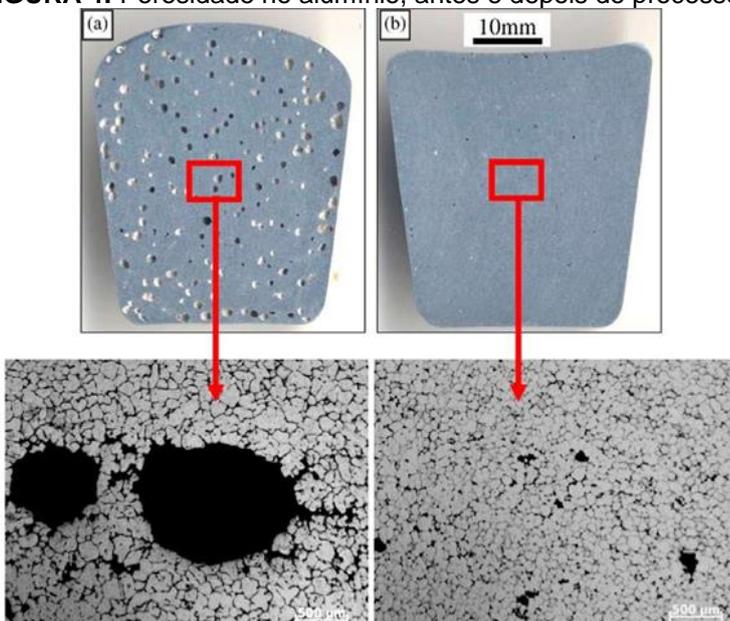
$\rho$  é a densidade a liga que se encontra na temperatura de fusão em gramas por centímetro cúbico.

$v$  é quantidade do gás contido na peça injetada com temperatura de 273K e pressão de 1 atm a 100 g da liga.

$v^*$  é o limite de solubilidade do gás com temperatura de 273K e pressão de 1 atm a 100 g da liga.

A porosidade também pode ser determinada a partir da medição da densidade do produto final. Esse experimento foi realizado em uma pesquisa, onde verificou-se a influência do corte no lingote de alumínio, antes da injeção. As amostras foram cortadas, lixadas e polidas para exame metalográfico, para visualização óptica da morfologia da porosidade. O cisalhamento intensivo do injetado não só pode conseguir o refinamento de grão, mas também, reduzir tanto o conteúdo como o tamanho da porosidade. A figura 4 apresenta a quantidade de porosidade no alumínio nas amostras injetadas e cortadas antes – figura 4(a) e depois – figura 4(b) do processo *HPDC* (ZUO *et al.*, 2010).

**FIGURA 4:** Porosidade no alumínio, antes e depois do processo *HPDC* (ZUO *et al.*, 2010).



Em matrizes para injeção de alumínio através do processo HPDC, os poros nem sempre serão irregulares. Tal fato pode ocorrer quando existir, uma grande quantidade de ar preso na matriz, decorrente de um canal mal dimensionado ou com pouca ocupação na bucha de injeção. É normal que apareçam poros com geometrias redondas, mesmo quando a contração seja a principal fonte de formação da porosidade. Quando verificado a presença de porosidade com formato com geometria irregular, esses podem ser derivados durante a contração do alumínio, que se formaram no início da solidificação (JORSTAD et al., 2008).

A porosidade em produtos injetados em alumínio, através do processo HPDC, é causada normalmente pela contração devido à solidificação. Porém, os poros podem ser gerados também através de gases aprisionados dentro da matriz, resultantes do fluxo de injeção (HANGAI et al., 2009).

A porosidade gerada pelo ar é atribuída ao aprisionamento de gás durante o fluxo de injeção durante o preenchimento da cavidade. Sendo que gás presente na liga de alumínio no seu estado líquido se desenvolve durante a sua solidificação. O processo HPDC minimiza o aprisionamento de ar quando comparado à injeção por gravidade, porém ao utilizar áreas transversais de alimentação maiores e velocidades de injeção mais baixas, ajuda evitar a turbulência. Ainda, a porosidade por ar preso também pode ser gerada a partir de gases dissolvidos no metal líquido, apesar de não ser um fator importante através do processo HPDC, devido aos tempos de ciclo ser baixo, se a solidificação for longa, pode permitir que o gás dissolvido formem a porosidade (VINARCIK, 2002).

Pode-se afirmar que o hidrogênio é um problema de solubilidade da liga de alumínio durante o fluxo de injeção no processo HPDC, o aprisionamento de ar é um problema dinâmico durante o fluxo do canal de alimentação até o preenchimento da cavidade, e a contração é um problema derivado da troca térmica (IRFAN et al., 2010).

Eventualmente, a porosidade também pode surgir no processo HPDC através da evaporação de desmoldantes aplicados para a extração do produto injetado. Ainda em alguns casos, poderá haver combinação de porosidade de aprisionamento de ar, com porosidade de contração. A quantidade de porosidade em produtos injetados pelo do processo HPDC pode ser alterada através da variação e quantidade de hidrogênio ou pela capacidade de solidificação (AMINUL et al., 2011).

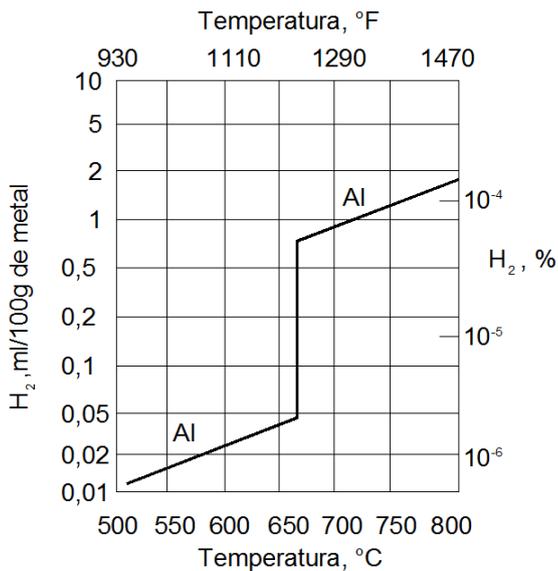
Pesquisas classificaram e identificaram a fonte de poros no processo HPDC através de cores. Se o poro é muito escuro provavelmente um lubrificante está causando a porosidade. Já, se o poro for brilhante, a origem dessa porosidade é derivada da evaporação da água (NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, 2011).

Produtos injetados em alumínio através do processo *HPDC* apresentam, muitas vezes, defeitos microestruturais resultantes do processo de moldagem, sendo a porosidade a mais preocupante, seguida pelas inclusões metálicas. Estes defeitos são diretamente prejudiciais para a vida em fadiga do produto, a presença de porosidade potencializa a nucleação e a propagação de trincas (VANDERESSE et al., 2011).

A porosidade gerada na contração, durante a solidificação do produto, podem ser classificadas como macroporosidade ou microporosidade. Sendo que o intervalo da solidificação determina se a porosidade é classificada, do tipo macro ou micro. A macroporosidade pode ser resultado de uma alimentação inadequada, muitas vezes decorrente do projeto errado do canal de alimentação do molde, com fluxo de material insuficiente, excesso de velocidade, turbulência ou até mesmo a injeção em local inadequado. Esse poro é conhecido como porosidade por ar preso. A microporosidade pode ser resultado da solidificação do alumínio, que muitas vezes é gerada em função de produtos com alta concentração de massa, bolsas posicionadas em local inadequado ou até mesmo o molde com refrigeração insuficiente. Esse poro é conhecido como, porosidade por contração (Campbell, 2004).

Em muitas situações, em função do hidrogênio, a porosidade é representada em forma de microporosidade. No entanto, em uma faixa estreita de solidificação e em uma faixa com maior viscosidade, pode-se tornar menor e o hidrogênio terá uma melhor chance de se aglutinar em poros maiores. A figura 5 apresenta a solubilidade do hidrogênio no alumínio, tanto no estado líquido, como no seu estado sólido. A solubilidade é mais baixa no alumínio sólido quando comparado com o alumínio líquido (APELIAN et al., 2006).

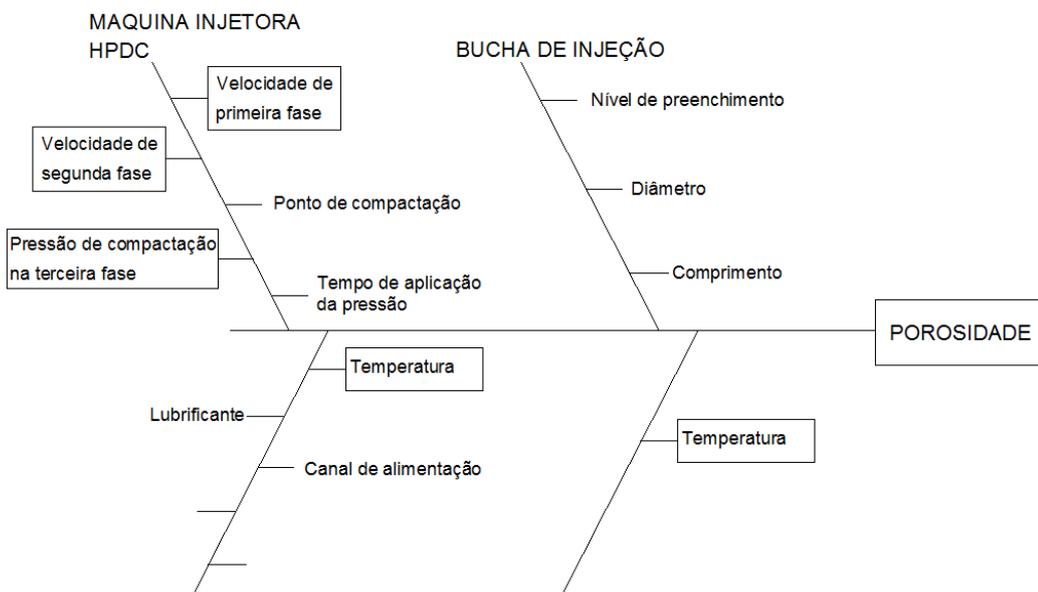
**FIGURA 5:** Solubilidade do Hidrogênio no alumínio (Apelian et al., 2006).



No processo *HPDC*, as ligas de alumínio possuem densidade maior no seu estado sólido, em comparação com ao seu estado líquido, essa variação poderá resultar em porosidade durante a solidificação, principalmente em um intervalo pequeno de temperatura. Canal de alimentação direcionado em uma região não adequada do produto poderá resultar em porosidade devido à contração, principalmente nas regiões com excesso de concentração de massa. O ar aprisionado, proveniente de um canal de alimentação do molde com comportamento turbulento, também poderá resultar em porosidade. Gases solúveis na liga líquida podem exceder o seu limite de solubilidade durante a solidificação e evoluir como um gás, também poderá resultar em porosidade. Decomposição de lubrificantes e produtos químicos utilizados durante o fabricação poderá resultar na formação de gás e o aprisionamento de metal (VINARCIK, 2002).

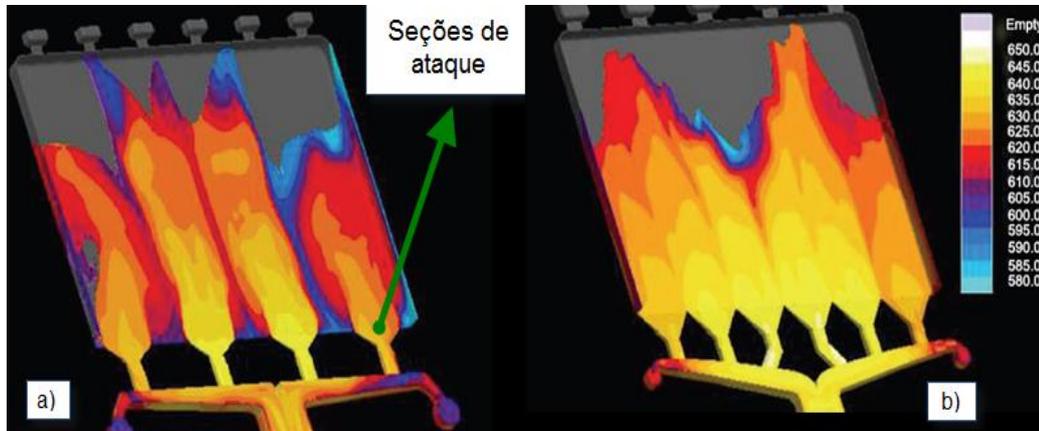
A porosidade em produtos obtidos através do processo *HPDC* depende de vários parâmetros de processo. Na figura 6 mostra um diagrama de causa e efeito, que foi desenvolvido de modo a identificar os parâmetros do processo de fundição sob pressão de alumínio. Pode-se destacar como parâmetros fundamentais, que contribuem para a origem de poros, a temperatura do forno, temperatura do molde, a velocidade do êmbolo na primeira fase, a velocidade do êmbolo na segunda fase e a pressão na terceira fase (TSOUKALAS, 2008).

**FIGURA 6:** Diagrama de causa e efeito para o surgimento de poros (TSOUKALAS, 2008)



Na figura 7 é apresentada a influência da seção de ataque no fluxo de injeção, sendo que, na figura 7a o produto é alimentado com quatro seções de ataque resultando em um grande encontro de fluxo dentro da cavidade, já na figura 7b o problema é minimizado ao número de seções de ataque que aumentaram para seis.

**FIGURA 7:** Temperatura da liga de alumínio injetada variando com a geometria do canal de alimentação (KIM *et. al.*, 2008).



A porosidade pode ocorrer na matriz ao fluxo violento durante a injeção do alumínio durante o processo *HPDC*, derivados da velocidade de primeira e de segunda fase. Diminuindo as respectivas velocidades, aumentando o tempo de injeção e ainda reduzindo a quantidade de ar aprisionado no fluxo de injeção. Porém a redução da velocidade de primeira e de segunda fase poderá aumentar os defeitos de superfície, como por exemplo, a solda fria que é uma falha resultante do encontro de fluxo de injeção (IWATA *et. al.*, 2013).

Foi pesquisada a relação do tamanho e quantidade de poros em função da velocidade de segunda fase, sendo que a porosidade com tamanho de até 0,2 mm ocorreu com frequência nas amostras analisadas, conforme apresentada tabela 1. A quantidade de poros nas amostras diminuiu com a velocidade de segunda fase em 2,8 m/s (Wilczek *et. al.*, 2015).

**TABELA 1:** Relação do tamanho e quantidade de poros em função da velocidade de segunda fase (Wilczek *et. al.*, 2015).

| Tamanho do poro (mm) | Velocidade de segunda fase de fundição (m/s) |         |         |
|----------------------|--|---------|---------|
|                      | 2,4  | 2,6     | 2,8     |
|                      | Quantidade de poros                          |         |         |
| 0,00–0,20            | 543±21                                       | 569±134 | 557±134 |
| 0,21–0,40            | 285±35                                       | 217±55  | 175±58  |
| 0,41–0,60            | 55±8   | 65±23   | 39±29   |
| 0,61–0,80            | 39±12  | 30±15   | 24±17   |
| 0,81-1,00            | 12±8   | 11±7    | 6±8     |
| 1,01-1,20            | 7±3  | 5±3     | 4±2     |
| >1,21                | 11±4   | 10±6    | 5±6     |

As características do fluxo de injeção de alumínio no processo *HPDC*, durante o preenchimento de uma cavidade, podem ser analisadas analiticamente, experimentalmente e numericamente. Em função das pequenas seções de alimentação, o fluxo de injeção tem um formato planar e veloz. Essas características dependem da velocidade de primeira fase, da velocidade de segunda fase e da velocidade no canal de alimentação (SCHNEIDERBAUER *et. al.*, 2011).

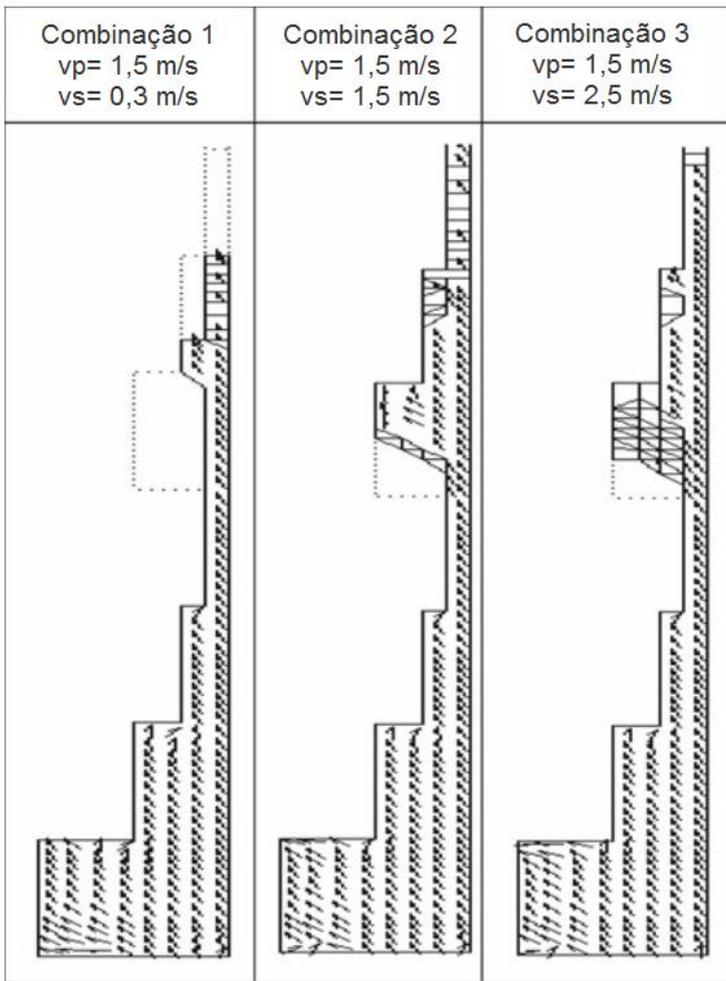
Os parâmetros do processo *HPDC* que afetam a qualidade dos produtos são, a velocidade de primeira fase, a velocidade de segunda fase, a pressão de injeção e o tempo de solidificação.

Porém a combinação da velocidade de primeira fase, velocidade de segunda fase e com o tempo de solidificação não possuem uma relação linear com a rugosidade do produto final. Porém a combinação da velocidade de primeira fase, velocidade de segunda fase e com a pressão de injeção possuem uma relação linear e significativa (KITTUR *et. al.*, 2014).

O coeficiente de transferência de calor por convecção entre o alumínio no seu estado líquido com a parede do canal de alimentação da cavidade do molde é uma função crescente da velocidade no canal, que é consequência da velocidade de primeira e da velocidade de segunda fase. Sendo assim o alumínio, se solidifica muito mais rápido no fluxo de injeção, tendendo a aumentar a sua viscosidade e dificultando o preenchimento da cavidade (REIKHER *et. al.*, 2013).

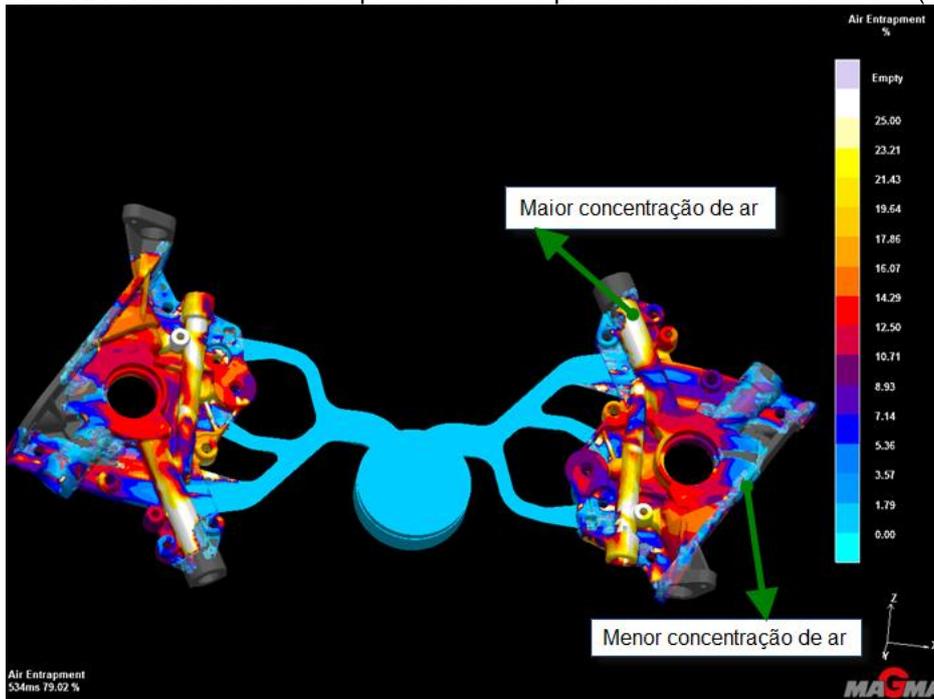
Falhas no processo de injeção de alumínio sob pressão, poderá ocorrer devido à complexidade do fluxo de injeção e variações de espessura no produto. Além disso, poderá ocorrer variação de pressão hidrostática, resultando em uma distribuição não homogênea da fase líquida, afetando assim as propriedades mecânicas das peças. Controlando a velocidade de primeira fase e de segunda fase poderá minimizar as falhas de preenchimento. Na figura 8 mostra a distribuição dos vetores de velocidade do fluxo para a velocidade de primeira e velocidade de segunda fase para diferentes combinações. A área vazia indica regiões não preenchidas, triângulos e quadrados mostram regiões com falhas de preenchimento devido a velocidades de injeção inadequada (KIMM *et. al.*, 2011).

**Figura 8:** Preenchimento variando com a velocidade de primeira fase e velocidade de segunda fase (KIMM *et. al.*, 2011).



Na figura 9 é apresentada a distribuição de ar preso de um produto injetado através do processo *HPDC*. É possível verificar que o maior percentual de ar preso encontra-se na região de maior concentração de massa do produto. O fluxo encontra-se a 79% da sua totalidade da análise de fluxo de injeção.

FIGURA 9: Quantidade de ar preso durante o preenchimento das cavidades (AUTOR, 2016).



Em muitos casos, a literatura relaciona a origem da porosidade com a refrigeração da matriz. O gradiente de temperatura no conjunto injetado é representado pela diferença de temperatura entre o alumínio e a matriz, podendo refletir na quantidade, localização e, ainda, no percentual de porosidade. A porosidade durante a injeção de alumínio também pode ser causada pela turbulência no canal de alimentação, ou seja, pelo borbulhamento do hidrogênio a partir de uma solução líquida ou pela contração durante a solidificação, muito embora, geralmente, é decorrente da combinação de ambos os efeitos (AMINUL *et al.*, 2011).

O alumínio injetado em alta pressão durante a sua solidificação poderá formar microporosidade. Em vez da porosidade ficar aprisionada na sua origem, a liga de alumínio poderá deslocar a porosidade para frente da solidificação, conduzindo toda a contração e a porosidade de gás para um local mais central, o que ressalta a importância da implementação e localização de bolsas (JORSTAD *et al.*, 2007).

As propriedades mecânicas de um produto injetado em alumínio através do processo *HPDC* dependem das características presentes no molde de injeção e dos parâmetros de processo. O principal defeito que pode alterar as propriedades mecânicas desejadas é o volumétrico, que ocorre durante o tempo de solidificação. A presença de porosidade gera possíveis concentrações de tensões, comprometendo sua resistência estrutural (DORUM *et al.*, 2009).

A primeira fase de injeção é a fase onde se define a posição do pistão que se desloca dentro da bucha de injeção. Essa primeira fase é realizada em baixa velocidade para permitir a saída do ar no interior da bucha de injeção e para não gerar turbulência. A primeira fase é concluída quando todo o volume de alumínio tenha sido eliminado da bucha de injeção. Basicamente, na primeira fase é determinado o curso da velocidade do pistão, sendo que o curso é relativo ao volume de alumínio necessário, ao comprimento da bucha e a taxa de ocupação volumétrica da bucha. A velocidade de primeira fase está relacionada com a porcentagem de enchimento da bucha de injeção durante o deslocamento do pistão, para evitar a turbulência e a formação de ondas durante o fluxo de injeção (MENDES, 2005).

A segunda fase de injeção é o curso restante do pistão, onde o alumínio no estado líquido preenche a matriz. Esta etapa é realizada com maior velocidade imediatamente após o término da primeira fase de injeção. Os parâmetros nesta fase são também o curso e a velocidade, sendo o curso determinado pela resultante do curso total da bucha de injeção, ou seja, é o curso total menos a primeira fase de injeção. Nessa fase, a velocidade depende da espessura das paredes e complexidade do produto a ser injetado (MALVAZI, 2005).

Na terceira fase de injeção, também conhecida como pressão de recalque, o parâmetro é definido como a pressão exercida pelo pistão de injeção sobre o metal ainda líquido. A pressão de recalque é utilizada após o preenchimento total da cavidade do molde, sendo que o seu objetivo é

expulsar o ar preso e, ainda, compensar variação volumétrica durante a contração do metal. A pressão de injeção depende das características desejadas do produto, seja quanto à qualidade da superfície ou quanto ao grau de compactação. Maiores pressões são normalmente aplicadas apenas para produtos com exigências de estanqueidade ou necessidades estruturais específicas. Para aplicar a terceira fase de injeção é necessário que a mesma ocorra imediatamente após o preenchimento da matriz, devendo-se ter o cuidado de observar o possível estágio de solidificação do material. O encontro do alumínio injetado com a matriz em alta temperatura resulta em uma maior viscosidade do alumínio, necessitando assim o aumento da pressão de injeção para se obter o efeito desejado (MALAVAZI, 2005).

Conhecendo a temperatura da matriz durante o fluxo de injeção, a velocidade do pistão na primeira fase, e a velocidade no canal de alimentação na segunda fase, são os parâmetros que podem auxiliar para entender o comportamento da porosidade no processo *HPDC* (TSOUKALAS, 2008).

O comportamento do fluxo de alumínio dentro da bucha de injeção é outra parte crítica do controle de fluxo. O desenho da propagação também é importante na otimização do fluxo na cavidade do molde. Já nas saídas de ar a partir da cavidade, se forem bem projetadas, as porosidades de ar podem ser reduzidas. Sistemas de vácuo podem ser usados para remover o ar, a partir da cavidade e reduzir ainda mais a porosidade (MILLER, 2010).

Em muitas situações durante o processo *HPDC*, o operador da injetora coloca uma quantidade de spray desmoldante acima do necessário, podendo gerar a porosidade através da evaporação do excesso existente (MONROE, 2009).

A previsão da porosidade em produtos injetados em alumínio, com aplicação específica para o processo *HPDC*, tem sido uma meta para empresas que desenvolvem softwares com a plataforma através do método dos elementos finitos. A complexibilidade da matemática envolvida e a inovação do assunto com aplicação do CAE específica para o processo potencializa o desafio (JORSTAD *et al.*, 2008).

As simulações através do método dos elementos finitos, também, podem ser utilizadas tanto para análise de fluxo de injeção ou para análise do comportamento durante a solidificação. Ambos os resultados são necessários para entender o comportamento de porosidade em produtos injetados através do processo *HPDC*, seja porosidade derivada do ar preso ou da contração. O comportamento do fluxo de injeção de alumínio em matrizes pode ser representado pelo aprisionamento do ar, ou pelo gradiente de temperatura durante a solidificação, ambos são conhecidos por determinar o comportamento da porosidade em produtos injetados em alumínio (IRFAN *et al.*, 2010).

Resultados do pós-processamento derivadas das simulações com tecnologia CAE, com foco na análise de fluxo e solidificação auxiliam para o entendimento do comportamento da porosidade com confiabilidade quando comparado a análises empíricas (SHOLAPURWALLA *et al.*, 2010).

Ainda, Zienkiewicz *et al.*, (2000), cita um tipo de simulação pode ser executada através de uma hipótese, de que a deformação de uma estrutura real pode ser aproximada pela superposição de um conjunto de curvas de forma definida. Porém, a amplitude não é especificada, e essas amplitudes das curvas são as que simbolizam as coordenadas generalizadas de um sistema simples.

Kleiber *et al.*, (1992), exemplificam que no Método de Rayleigh-Ritz a escolha de uma função para um deslocamento é feita de forma a considerar fielmente as condições de contorno de um modelo físico e, em seguida, é realizada a sua substituição na equação da energia potencial do modelo estudado.

Segundo Uddanwadiker *et al.* (2007), os passos básicos para uma simulação via elementos finitos são o pré-processamento, processamento e pós-processamento. No pré-processamento é necessário um modelo geométrico, normalmente produzido em CAD 2D ou CAD 3D, sendo que, quanto melhor a qualidade do modelo, maior será a confiabilidade dos resultados. Ainda neste passo, a complexidade de um modelo geométrico necessita de uma maior quantidade de elementos a serem aplicados. Isto ocorre porque existe ainda a configuração e a alimentação de dados como as propriedades físicas e mecânicas do material, os quais são muito importantes para se obter confiabilidade dos resultados. Pode-se chamar de etapa final do pré-processamento a entrada das condições de contorno físicas, quais sejam: forças, pressões, acelerações, massas e temperaturas. Ainda, são somadas com as restrições de deslocamento, aplicadas aos nós especificados, conforme o modelo. Durante o processamento, o software resolverá um conjunto de equações de engenharia de forma simultânea, podendo ser composto com grande quantidade de variáveis para alcançar o resultado desejado. O pós-processamento determina a apresentação gráfica dos resultados da

simulação dos elementos finitos que normalmente, é representada através de gradiente de cores ou gráficos que mostram o comportamento da geometria simulada.

Durante o processo de injeção sob pressão, as variáveis como a pressão de injeção, baixa taxa de ocupação volumétrica da bucha de injeção, excesso de desmoldantes e lubrificantes em moldes também podem contribuir para a formação de porosidade em produtos obtidos através do processo HPDC (PROSKE *et. al.*, 2009).

Sabe-se que o aumento da pressão de injeção durante o processo pode representar uma grande influência no aparecimento de porosidade em produtos injetados *através do processo HPDC*, sendo que isto pode ser uma combinação de porosidade por contração, mais a porosidade por aprisionamento de ar. No processo de injeção, o aumento da pressão também permite uma maior eficiência do escoamento do fluxo de alimentação através do canal. No entanto, a intensificação da pressão não pode eliminar a porosidade, apenas a reduz (SHOLAPURWALLA *et. al.*, 2010).

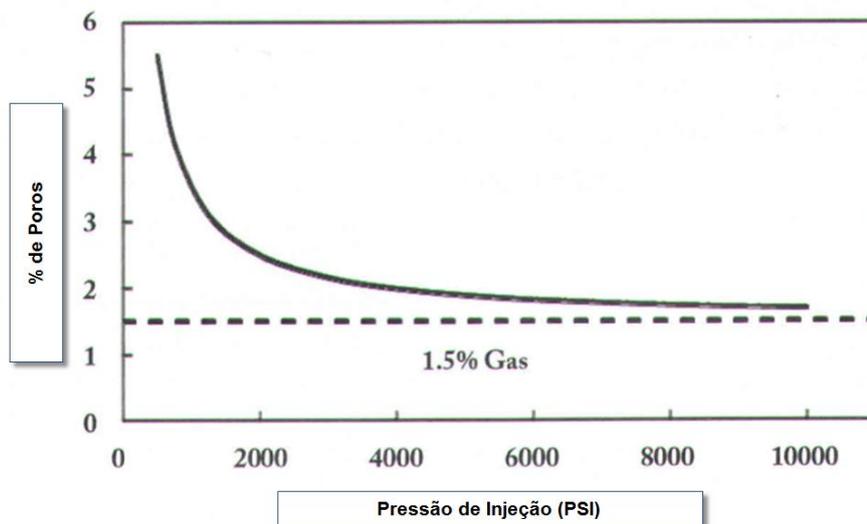
A probabilidade de surgimento da porosidade diminui com a intensificação da pressão de injeção. Entretanto, poderá aumentar com velocidades excessivas durante o fluxo de injeção já no canal de alimentação, aumentando a probabilidade de turbulência no escoamento. A baixa taxa de ocupação volumétrica na bucha de injeção e mudanças bruscas de geometria de canal de alimentação também podem gerar possíveis turbulências. Se estes parâmetros não forem controlados adequadamente, poros poderão ser gerados (CAMPATELLI *et al.*, 2011).

Para ser injetado, o alumínio deve ser forçado com o emprego da pressão de injeção. Tal pressão permite que o alumínio, ainda no estado líquido, se molde conforme a geometria da matriz. A qualidade de um produto injetado em alumínio através do processo HPDC é afetada pela relação preenchimento das cavidades da matriz versus solidificação. Sendo assim, a quantidade de injeção aplicada é fundamental para a produção de produtos em alumínio (CAMPATELLI *et al.*, 2011).

A pressão de injeção, que dependendo do produto a ser obtido varia entre 60 a 100 MPa, pressões erradas podem induzir ao aprisionamento de ar, resultando em porosidade no produto final (ROBBINS, 2012).

A tendência é que ocorra a redução de porosidade com o aumento da pressão de injeção. Brevick e Mobley (2001) sugerem a relação percentual de porosidade com a intensificação da pressão de injeção. Esta relação está representada na figura 10. Para esta figura, a presença de poros é cerca de 1,5% de porosidade em função do gás presente na matriz. Para pressões de injeção com intervalo de 6,000-7,000 PSI a 10.000 PSI, a porosidade diminui, mostrando que de fato existe uma relação inversa entre porosidade e a pressão de injeção.

**FIGURA 10:** Fração de porosidade teórica como uma função de intensificação da pressão de injeção (BREVICK *et. al.*, 2001).



A perda de carga aplicada a moldes pode ser definida como, uma forma de dissipação de energia durante o fluxo de injeção do alumínio. Essa perda ocorre principalmente, devido às alterações de trajetória do canal, bem como alterações de geometria do produto, visto que a superfície do aço da matriz é polida e o coeficiente de atrito é desprezível. A perda de carga que

ocorre ao longo do canal de alimentação é chamada de perda distribuída, enquanto que as perdas dentro do volume do produto denominam-se perda localizada.

Em produtos, onde o canal de alimentação não pode alcançar com eficiência todas as áreas, o resultado poderá ser decorrente de possíveis poros de nucleação, fenômeno que ocorre em função da queda de pressão durante o processo de injeção. A queda de pressão, conhecida na mecânica dos fluidos como perda de carga, as variáveis como o produto, trajetória do fluxo, turbulência e variações de geometria na trajetória do fluxo, contribuem e aceleram a perda de pressão no canal de alimentação, ou seja, há uma perda de eficiência durante o fluxo de injeção.

$$\left( P_{fa} + \rho \times \frac{\bar{V}_{fa}^2}{2} + \rho \times g \times z_{fa} \right) - \left( P_p + \rho \times \frac{\bar{V}_p^2}{2} + \rho \times g \times z_p \right) = \left( K \times \frac{\bar{V}^2}{2} \right) + \left( f \times \frac{L}{D} \times \frac{\bar{V}^2}{2} \right)$$

(1)

Onde;

$f$  é o fator de atrito devido ao material, e também à velocidade do fluxo de injeção;

$L$  é o comprimento total do fluxo, distância do contra-pistão até a bolsa mais distante;

$D$  é o diâmetro hidráulico da seção do canal de alimentação;

$\bar{V}$ , é a velocidade média, segmentada em parcelas de velocidade de 1º fase, velocidade de 2º fase e velocidade média dentro do produto.

$K$ , é o coeficiente de perda de carga localizado.

$i$ , ponto de referência, início do fluxo, bucha de injeção;

$c$ , ponto de referência, final do fluxo, contra-pistão.

$c$ , ponto de referência, início do fluxo, contra-pistão.

$ia$ , ponto de referência, final do fluxo, alimentação da cavidade.

Sendo assim, devido ao fluxo de injeção durante o preenchimento da cavidade, conclui-se que a perda de carga em um canal de alimentação é um somatório de perdas de carga, seja pela turbulência em canais, quando o canal tem excesso de velocidades, pelas diferenças de trajetórias do canal de alimentação ou pela alteração de fluxo em função da geometria do produto desejado. Canais de alimentação com o perímetro de fluxo maximizado podem ser utilizados para reduzir a quantidade de porosidade por contração. Quando o percurso do fluxo de injeção é ampliado, ocorre a linearização do escoamento do material, ou seja, diminuiu-se a turbulência do canal.

Linearização do fluxo de injeção é recomendada, devido à alta velocidade de injeção, esta opção pode ser obtida com canais de maiores trajetórias. Por outro lado, isto pode aumentar a perda de carga, ou seja, gerar o aumento do gradiente de pressão de injeção, além de diminuir a eficiência metalúrgica do processo.

### 3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização desta pesquisa, foi optado em trabalhar com os principais parâmetros do processo de injeção de alumínio sob pressão, controláveis e mensuráveis, podendo destacar a liga do alumínio, temperatura da matriz, temperatura do alumínio, pressão de injeção, velocidade de primeira e da velocidade de segunda fase. A velocidade de primeira e de segunda fase, definidas como condições de contorno, sendo determinadas diretamente no painel da injetora. O valor da pressão de injeção depende do diâmetro do pistão, na qual trabalha internamente na bucha de injeção, porém é importante destacar que o valor do diâmetro do pistão, depende da taxa de ocupação volumétrica, porém nessa pesquisa a pressão de injeção, ficou definida como parâmetro constante. A taxa de ocupação volumétrica depende do volume necessário para cada ciclo de injeção, sendo assim, o somatório dos volumes de produto, canais e bolsas. Experimentalmente recomenda-se que o volume da taxa de ocupação volumétrica fique entre 40 a 60% do volume disponível na bucha de injeção.

Para injeção das amostras optou-se pela parceria com a Metalúrgica Starcast Ltda., localizada em Guarulhos SP, onde foi utilizado um molde para injeção de alumínio existente, também fornecido pela mesma empresa. A escolha por esta ferramenta se deu pelo histórico de porosidade ao longo de sua vida. Assim foi possível eliminar custos de construção de molde e reduzir o tempo de

pesquisa. Para a obtenção das amostras através do processo *HPDC*, foi definido variar os percentuais da velocidade de primeira e da velocidade de segunda fase, sendo a pressão de injeção, foi definido como um parâmetro de processo constante. Na tabela 2 são apresentados os materiais, tratamentos e dureza, dos principais componentes do molde para a injeção das amostras.

**TABELA 2:** Configuração estrutural do molde

| COMPONENTE      | AÇO      | TRATAMENTOS TÉRMICOS                     |
|-----------------|----------|--|
| Matriz superior | AISI H13 | Temperado, revenido e nitretado, 44 HRc  |
| Matriz inferior | AISI H13 | Temperado, revenido e nitretado, 44 HRc  |
| Colunas         | SAE 8620 | Temperado, revenido e cementado, 58 HRc  |
| Buchas          | SAE 8620 | Temperado, revenido e cementado, 58 HRc. |
| Placa extratora | SAE 1045 | Não aplicado                             |

Para realizar obter as amostras, foi necessário injetar os parâmetros apresentados na tabela 3. Para iniciar a injeção das amostras, foi primeiramente necessário realizar a fusão de 10 kg da liga SAE 308, para o qual foi utilizado um forno de indução elétrica da marca Inductotherme com potência de 250 kW. Para compensar o calor perdido durante o processo de desgaseificação e o deslocamento até o forno dosador, a carga foi aquecida até a temperatura de 760°C.

O tempo necessário para atingir a temperatura de manuseio foi de 30 minutos. Já para a realização da desgaseificação, a carga foi transferida para o cadinho de transporte, onde ficou borbulhando em nitrogênio durante 10 minutos. Após a retirada da escória concentrada na superfície do cadinho, a carga foi transportada por uma empilhadeira até o forno autodosador da injetora. Para a produção das amostras foi utilizada uma injetora Colosio 550T, conforme mostra a figura 11. A célula de injeção é composta pelo forno autodosador, injetora, robô para retirada do produto do molde, tanque de resfriamento e rebarbador. Nessa célula de injeção, todo o processo é automatizado, restando ao operador apenas a supervisão do processo.

**FIGURA 11:** Injetora de alumínio para o processo *HPDC*.



O ciclo de injeção inicia com a dosagem automática pelo forno da carga de alumínio a ser injetada na bucha de injeção. Ao injetar o alumínio, o produto se solidifica, a injetora e o molde se abrem para que o robô retire pelo canal de alimentação o produto do molde. Durante este processo, foi necessária a aplicação de desmoldante na matriz do molde por um mecanismo na parte superior da injetora, esse recurso é importante, porque o alumínio agarra na superfície da matriz, dificultando a

extração do produto. Todo este processo é realizado de forma automatizada, durando cerca de 80 segundos.

**TABELA 3:** Definição dos parâmetros de injeção

|                                     |          |
|-------------------------------------|----------|
| Temperatura do alumínio líquido (C) | 760      |
| Temperatura do molde (C)            | 288      |
| Velocidade primeira fase (m/s)      | Variável |
| Velocidade segunda fase (m/s)       | Variável |
| Pressão de injeção (Bar)            | 734      |
| Curso do pistão (mm)                | 250      |

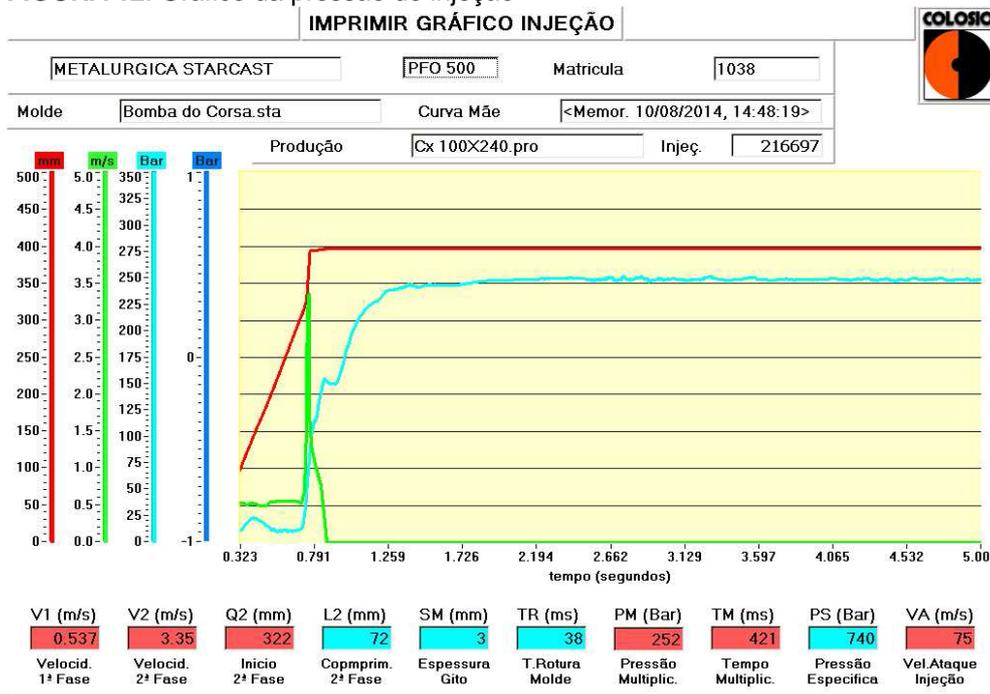
Na tabela 4, é apresentada a composição química da liga de alumínio 308, que foi utilizada para a injeção das amostras.

**TABELA 4:** Composição química da liga 308.

| Elemento | Si  | Cu  | Mn  | Mg  | Fe  | Zn  | Ni  | Al   |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| %        | 9.5 | 3.0 | 0.4 | 0.5 | 0.9 | 1.0 | 0.3 | Rest |

Para analisar a influência da velocidade de primeira fase e a velocidade de segunda fase, quanto ao comportamento da porosidade no processo *HPDC*, foi necessária a combinação de condições de contorno, sejam elas na simulação via elementos finitos, bem como a sua reprodução durante o processo de injeção sob pressão. Na figura 12 é apresentado, o gráfico de como se comporta a pressão de injeção do alumínio em função das velocidades de primeira e de segunda fase na injetora Colosio 500T.

**FIGURA 12:** Gráfico da pressão de injeção



Os percentuais escolhidos, para a velocidade de primeira e a velocidade de segunda fase foram definidos a partir de valores mínimos necessários para obter os produtos através do processo *HPDC*. Para o caso da velocidade de primeira fase, não foi possível obter amostras físicas com condições mínimas de preenchimento, quando o percentual é abaixo de 15%, já para a velocidade máxima de primeira e de segunda fase, o máximo possível fornecido pela injetora é de 99%. Quanto à pressão de injeção, foi adotado o valor constante de 724bar. Na tabela 5, são apresentados os parâmetros de injeção aplicados na injetora. Onde o %Vp, é o percentual da velocidade da primeira fase, parâmetro definido em percentual no painel da injetora, o Vp, velocidade da primeira fase em m/s, é o valor resultante a partir do %Vp, sendo que a injetora calcula automaticamente. A mesma

analogia é aplicada ao %Vs, percentual da velocidade da segunda fase e ao Vs, velocidade da segunda fase em m/s.

**TABELA 5:** Definição dos parâmetros de injeção

| Hipótese | % Vp | Vp (m/s) | % Vs | Vs (m/s) |
|----------|------|----------|------|----------|
| 1        | 15   | 0,03     | 5    | 0,58     |
| 2        | 15   | 0,03     | 50   | 3,57     |
| 3        | 15   | 0,03     | 99   | 4,20     |
| 4        | 50   | 0,26     | 5    | 0,58     |
| 5        | 50   | 0,27     | 50   | 3,20     |
| 6        | 50   | 0,26     | 99   | 4,01     |
| 7        | 99   | 0,28     | 5    | 0,82     |
| 8        | 99   | 0,28     | 50   | 2,81     |
| 9        | 99   | 0,29     | 99   | 3,15     |

Analisar a velocidade no canal de alimentação é importante para controlar sua amplitude máxima, pois quando acima do recomendável cerca de 40 m/s, a energia aplicada à matriz devida choque do fluxo de injeção no aço da matriz, resulta em um aumento concentração de calor, reduzindo de forma a dureza do aço, possibilitando a geração de trincas no aço, problema comum do processo *HPDC*, porém esse resultado não tem interferência direta ao comportamento da porosidade proposta. Já o tempo de solidificação é importante para controlar as concentrações de massa, ajuda a auxiliar na localização da refrigeração da matriz do molde, além de permitir que a fundição possa estimar a produtividade do molde. Somando o tempo de preenchimento mais o tempo de solidificação, tem-se o tempo bem aproximado do ciclo de injeção. Quanto o resultado da porosidade, não identifica seu comportamento e origem, mas é importante para analisar o seu volume e localização no produto, auxiliando durante o projeto do molde, prever se a porosidade comprometerá o produto quando a classificação de aceitação de porosidade, ou ainda, se a porosidade encontra-se em regiões que sofrerão processo de usinagem posterior.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 6, foram apresentados os valores simulados na seção de alimentação do produto, sendo que o valor destacado em negrito é o recomendável, pois visa o fluxo com menor tendência a turbulência e ainda pode maximizar a vida da matriz. Segundo a NADCA, recomendam-se valores aproximados aos 40m/s para a velocidade no canal de alimentação, para o preenchimento do produto. Valores acima deste, aumentam de forma consideravelmente a probabilidade de desgaste na matriz, falha proveniente da cavitação na matriz devido ao fluxo de injeção. O melhor resultado obtido na simulação foi para a velocidade de primeira fase em 0,290 m/s e com a velocidade de segunda fase em 3,150 m/s, resultando com a velocidade no ataque em 42,855 m/s.

**TABELA 6:** Velocidade no ataque

| Velocidade 1° fase (m/s) | Velocidade 2° fase (m/s) | Velocidade no ataque (m/s) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 0,03                     | 0,58                     | 11,282                     |
| 0,03                     | 3,57                     | 86,106                     |
| 0,03                     | 4,20                     | 101,160                    |
| 0,26                     | 0,58                     | 22,687                     |
| 0,27                     | 3,20                     | 81,354                     |
| 0,26                     | 4,01                     | 101,190                    |
| 0,28                     | 0,82                     | 14,832                     |
| 0,28                     | 2,81                     | 56,622                     |
| <b>0,29</b>              | <b>3,15</b>              | <b>42,855</b>              |

A partir dos resultados obtidos nas simulações apresentadas tabela 6, foi desenvolvida a equação matemática para a velocidade do canal, com o auxílio do software Jump. Utilizando o método dos mínimos quadrados, com a equação em função da velocidade de primeira fase e de velocidade de segunda fase, resultando no modelo estatístico para a velocidade do canal.

$$\varphi(x) = \alpha_1 g_1(x) + \alpha_2 g_2(x) + \alpha_3 g_3(x) + \dots + \alpha_n g_n(x)$$

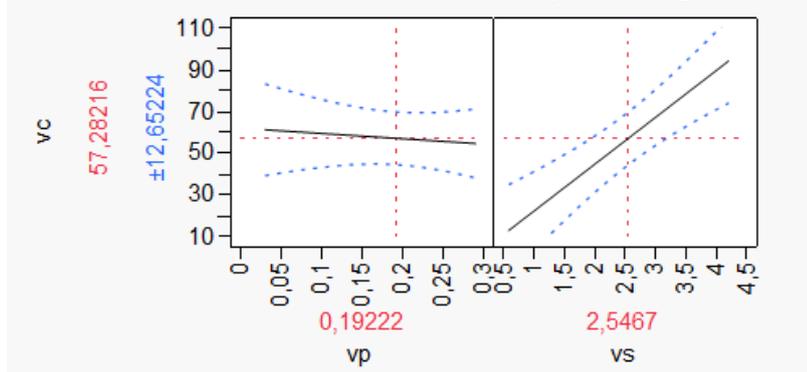
$$f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \varphi(x_k)]^2 = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)]^2$$

$$vc = f(vp, vs)$$

$$vc = 4,9509 - 25,3853 \times vp + 22,4649 \times vs + (vp - 0,1922) \times ((vs - 2,5467) \times -15,2192)$$

Nos gráficos da figura 13, é apresentado o comportamento da velocidade no canal de alimentação, onde foi verificada a variação da velocidade no canal de alimentação, em função da velocidade de primeira e de segunda fase. Fica evidente que não há influência da velocidade de primeira fase para o canal de alimentação, porém a velocidade de segunda fase interfere diretamente na velocidade do canal, ou seja, na seção onde alimenta o produto na cavidade do molde.

**FIGURA 13:** Velocidade no canal de alimentação em função da velocidade de primeira e de segunda fase.



Na tabela 7, é apresentado o tempo de preenchimento em função da velocidade de primeira fase e da velocidade de segunda fase. Para o menor tempo de preenchimento, é quando a velocidade no ataque consegue preencher a cavidade em um menor tempo. Sendo assim, o menor tempo obtido na simulação, foi para a velocidade de primeira fase em 0,290 m/s e para a velocidade de segunda fase em 3,150 m/s, resultando no menor tempo de preenchimento de 0,467 s, coincidindo com a melhor velocidade no ataque de 42,855 m/s apresentado na tabela 6..

**TABELA 7:** Tempo de preenchimento

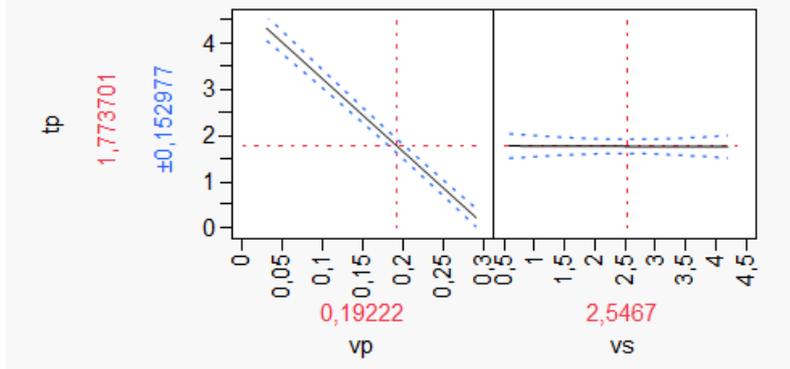
| Velocidade 1° fase (m/s) | Velocidade 2° fase (m/s) | Tempo de preenchimento (s) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 0,03                     | 0,58                     | 4,4249                     |
| 0,03                     | 3,57                     | 4,2956                     |
| 0,03                     | 4,20                     | 4,2725                     |
| 0,26                     | 0,58                     | 0,4909                     |
| 0,27                     | 3,20                     | 0,4973                     |
| 0,26                     | 4,01                     | 0,5114                     |
| 0,28                     | 0,82                     | 0,4814                     |
| 0,28                     | 2,81                     | 0,4842                     |
| <b>0,29</b>              | <b>3,15</b>              | <b>0,4674</b>              |

Tem-se o seguinte modelo estatístico para o tempo de preenchimento:

$$tp = 4,8109 - 15,7342 \times vp - 0,005034 \times vs + (vp - 0,1922) \times ((vs - 2,5466) \times 0,2227)$$

Na figura 14, é apresentado o comportamento do tempo de preenchimento em função das velocidades. Diferente da velocidade no canal, o tempo de preenchimento é dependente da velocidade de primeira fase. Na velocidade de segunda fase, o tempo de preenchimento apresentou o comportamento constante.

**FIGURA 14:** Tempo de preenchimento em função da velocidade de primeira e de segunda fase.



Na tabela 8, é apresentado os valores do tempo de solidificação em função da velocidade de primeira fase e da velocidade de segunda fase. Nesta tabela é destacado o menor tempo de solidificação, mas é importante que o tempo de solidificação seja o menor possível, porque além de maximizar a produtividade através do processo *HPDC*, diminui-se o gradiente de temperatura na matriz, reduzindo as tensões térmicas no molde e ainda pode estabilizar as propriedades mecânicas no produto. Quanto maior o tempo de solidificação, maior é a contribuição do efeito da concentração de massa do produto, na geração de porosidade. Conforme resultados obtidos nas simulações, quanto menor o tempo de solidificação, menor é o volume de porosidade gerada através do processo *HPDC*.

**TABELA 8:** Tempo de solidificação

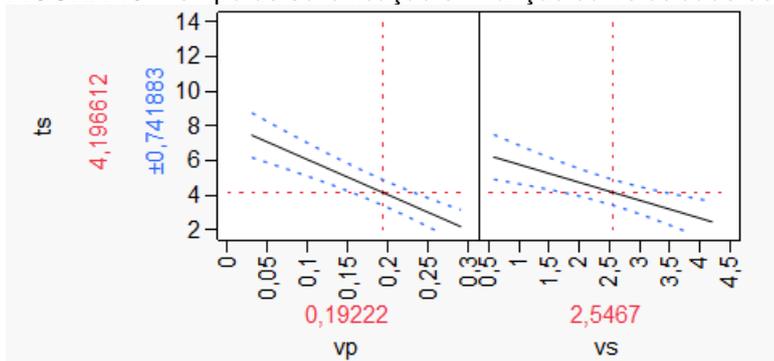
| Velocidade 1° fase (m/s) | Velocidade 2° fase (m/s) | Tempo de solidificação (s) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 0,03                     | 0,58                     | 13,8790                    |
| 0,03                     | 3,57                     | 2,9293                     |
| 0,03                     | 4,20                     | 3,5075                     |
| 0,26                     | 0,58                     | 2,7271                     |
| <b>0,27</b>              | <b>3,20</b>              | <b>2,4435</b>              |
| 0,26                     | 4,01                     | 2,4876                     |
| 0,28                     | 0,82                     | 2,6421                     |
| 0,28                     | 2,81                     | 2,5072                     |
| 0,29                     | 3,15                     | 2,4983                     |

A partir dos resultados obtidos na tabela 8, é apresentada a equação estatística do tempo de solidificação em função da velocidade de primeira e da velocidade de segunda fase.

$$ts = 10,7290 - 20,3001 \times vp - 1,0328 \times vs + (vp - 0,1922) \times ((vs - 2,5467) \times 12,7897$$

Na figura 15, é apresentada a influência da velocidade de primeira fase e da velocidade de segunda fase, para o tempo de solidificação. Observa-se que as curvas do tempo de solidificação são semelhantes para ambas as condições.

**FIGURA 15:** Tempo de solidificação em função da velocidade de primeira e de segunda fase.



Na tabela 9 é apresentada, os valores finais simulados dos volumes de porosidade para cada hipótese proposta, sendo que a melhor condição é quando o volume é de 698,75 mm<sup>3</sup>.

A partir dos resultados simulados, verificou-se que o menor volume de porosidade se dá quando o tempo de solidificação é menor, e que o tempo de preenchimento e a velocidade no canal de alimentação não tem influência no resultado do volume de porosidade. Portanto, é importante minimizar gradientes de temperatura durante o fluxo de preenchimento, bem como se desenvolver circuitos de refrigeração com eficiência para a matriz do molde, com aplicação ao processo *HPDC*.

Para o menor tempo de preenchimento, não apresentou influência positiva no comportamento da porosidade. Portanto, o menor tempo pode ser possivelmente contribuir, para a geração de porosidade através do ar preso, e o excesso de velocidade, pode contribuir na geração de porosidade em função da turbulência no fluxo de injeção, resultando também em porosidade através do ar preso.

**TABELA 9:** Porosidade

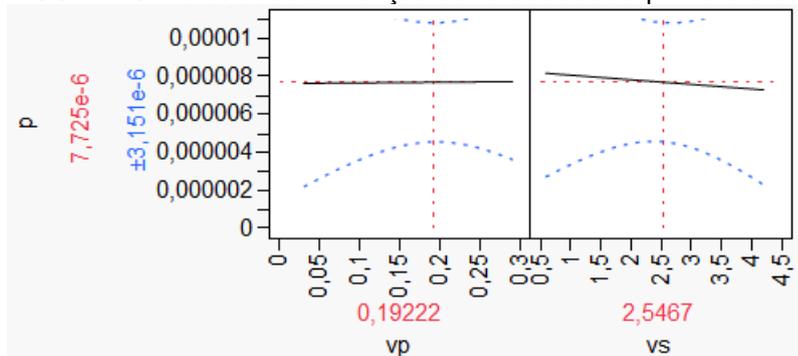
| Velocidade 1° fase (m/s) | Velocidade 2° fase (m/s) | Porosidade (m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 0,03                     | 0,58                     | 6,8269e-06                   |
| 0,03                     | 3,57                     | 6,8612e-06                   |
| 0,03                     | 4,20                     | 9,7893e-06                   |
| 0,26                     | 0,58                     | 9,6775e-06                   |
| <b>0,27</b>              | <b>3,20</b>              | <b>6,8975e-07</b>            |
| 0,26                     | 4,01                     | 1,0113e-05                   |
| 0,28                     | 0,82                     | 9,1557e-06                   |
| 0,28                     | 2,81                     | 7,1241e-06                   |
| 0,29                     | 3,15                     | 1,013e-05                    |

A partir dos resultados apresentados na tabela 9, é apresentado o modelo matemático da porosidade em função das velocidades de primeira e de segunda fase. Tem-se assim o seguinte o modelo estatístico para o tempo de solidificação:

$$p = 0,00000008281 + 0,0000003290 \times vp - 2,4307e - 7 \times vs + (vp - 0,1922) \times ((vs - 2,5467) \times -0,0000004999$$

Na figura 16, é possível verificar que tanto a velocidade de primeira fase, como a velocidade de segunda fase não tem uma relação direta com o volume de porosidade. O menor volume de porosidade, foi obtido com a velocidade de primeira fase em 0,270m/s e com a velocidade de segunda fase em 3,200m/s, conclui-se que o menor volume de poros está relacionado com o menor tempo de solidificação, como foi apresentado na tabela 8.

**FIGURA 16:** Porosidade em função da velocidade de primeira e de segunda fase.



Na tabela 10 apresenta-se o resumo geral, de todos os valores obtidos nas simulações para cada condição de contorno proposta. Na hipótese 5 (coluna H), foi verificada a melhor condição obtida nas simulações. Porém, variáveis de processo - entre outros - não podem ser simulados. Sendo assim, existe uma margem de erro possível do resultado da simulação versus resultados obtidos por raios X. Após injeção das amostras, totalizando 3 amostras por hipóteses, totalizando 27 amostras. Depois de contempladas, todas as condições de contorno de engenharia e de processo, foram possíveis analisá-las através do aparelho de raios X, equipamento cedido pela Alumec Ltda, localizada em Guarulhos, SP. Na figura 17 é apresentado, o equipamento para análise através de raio

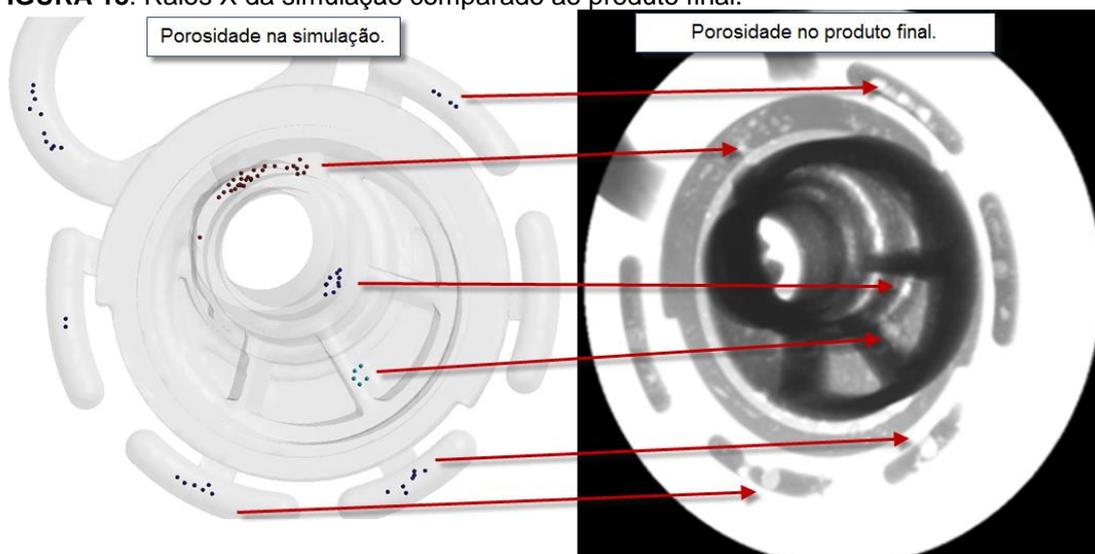
X, utilizando-se um sistema de captação de imagem de fluoroscopia digital, modelo Radioscopic Inspection System DP 432.158HP.

**FIGURA 17:** Equipamento para raio-x.



Na figura 18, é apresentando a porosidade obtida na simulação no lado esquerdo, comparado com a porosidade obtida no produto final, conforme imagem no lado direito gerada pelo raio-x.

**FIGURA 18:** Raios X da simulação comparado ao produto final.



**TABELA 10:** Resultados gerais do pós processamento

| H        | Velocidade 1° fase (m/s) | Velocidade 2° fase (m/s) | Velocidade no canal (m/s) | Tempo de preenchimento (s) | Tempo de solidificação (s) | Porosidade (m³)   |
|----------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| 1        | 0,03                     | 0,58                     | 11,282                    | 4,4249                     | 13,879                     | 6,8269e-06        |
| 2        | 0,03                     | 3,57                     | 86,106                    | 4,2956                     | 2,9293                     | 6,8612e-06        |
| 3        | 0,03                     | 4,20                     | 101,160                   | 4,2725                     | 3,5075                     | 9,7893e-06        |
| 4        | 0,26                     | 0,58                     | 22,687                    | 0,4909                     | 2,7271                     | 9,6775e-06        |
| <b>5</b> | <b>0,27</b>              | <b>3,20</b>              | <b>81,354</b>             | <b>0,4973</b>              | <b>2,4435</b>              | <b>6,8975e-07</b> |
| 6        | 0,26                     | 4,01                     | 101,190                   | 0,5114                     | 2,4876                     | 1,0113e-05        |
| 7        | 0,28                     | 0,82                     | 14,832                    | 0,4814                     | 2,6421                     | 9,1557e-06        |
| 8        | 0,28                     | 2,81                     | 56,622                    | 0,4842                     | 2,5072                     | 7,1241e-06        |
| 9        | 0,29                     | 3,15                     | 42,855                    | 0,4674                     | 2,4983                     | 1,0130e-05        |

Para desenvolver a equação matemática estatística com o software Jump, foi utilizados os valores das velocidades de primeira fase, das velocidades de segunda fase, das velocidades no

canal, dos tempos de preenchimento, dos tempos de solidificação e por fim, dos volumes de porosidade, apresentados na tabela 10. A equação matemática estatística geral do comportamento da porosidade proposta é representada como função das variáveis velocidades de primeira fase e de segunda fase, velocidade no canal, tempo de preenchimento e tempo de solidificação.

$$p = 0,0001667 - (0,0005424 \times vp) + (0,00001143 \times vs) - (0,0000004639 \times vc) - (0,00003553 \times tp) + (0,0000001385 \times ts) + (vp - 0,1922) \times ((vs - 2,5467) \times (-0,00002186))$$

A equação geral do comportamento da porosidade, é ainda mais completa quando se aplica, às variáveis temperatura do molde, normalmente entre 250 a 260 °C, simultaneamente com a temperatura do alumínio injetado, variando entre 690 a 700 °C.

$$p = f(vp, vs, vc, tp, ts, tm, ta)$$

$$p = -0,001112 - 0,00008212 \times \left( \frac{(vp - 0,16)}{0,13} \right) + 0,00001243 \times \left( \frac{(vs - 2,39)}{1,81} \right) - 0,00001616 \times \left( \frac{(vc - 56,236)}{44,954} \right) - 0,00007271 \times \left( \frac{(tp - 2,4461)}{1,9787} \right) - 0,0000007405 \times \left( \frac{(ts - 8,1612)}{5,7177} \right) + 0,0000002099 \times tm + 0,000001523 \times ta + \left( \frac{(vs - 2,39)}{1,81} \right) \times \left( \left( \frac{(vc - 56,236)}{44,954} \right) \times 0,000002663 \right) + (tm - 255,4444)$$

## 5. CONCLUSÃO

O mapeamento do comportamento da porosidade e das possíveis soluções para a sua eliminação, permitem eficiência e economia para a indústria de fundição sob pressão. A principal contribuição dessa pesquisa foi verificar através de simulações e comprovar através de análise de raios X, que o tempo de solidificação é a principal fonte de origem de porosidade em produtos obtidos através do processo *HPDC*.

As simulações derivadas da análise de fluxo e de solidificação são fundamentais para determinar a probabilidade ou não da ocorrência de porosidade, conclui-se que a velocidade de primeira e a velocidade de segunda fase, são determinantes para a velocidade no canal de alimentação, tempo de preenchimento e tempo de solidificação. Mas a velocidade de primeira e de segunda fase não tem uma relação direta com o comportamento da porosidade, mas sim o tempo de solidificação.

Através dos resultados obtidos das simulações, bem como dados de entrada do processo de injeção do processo *HPDC*, permitiu a criação de um banco de dados para o desenvolvimento de uma equação matemática que se contempla todos os parâmetros de injeção sob pressão possíveis pesquisados.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] AMINUL, I., ZOHEIR, N. F., The Influence of Porosity and Hot Isostatic Pressing Treatment on Wear Characteristics of Cast and P/M Aluminum Alloys, Department of Process Engineering and Applied Science, Materials Engineering Program, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada B3 J 2X4, 2011.
- [2] APELIAN, D., MAKHOUF, M., High Integrity Aluminum Die Casting (Alloy, Process, Melt Preparation), Wheeling, IL: North American Die Casting Association, EUA, 2006.
- [3] BREVICK, J., Die Casting Porosity Guidebook Wheeling, IL: North American Die Casting Association, EUA, 2009.
- [4] CAMPATELLI, G., SCIPPA, A., A Heuristic Approach to Meet Geometric Tolerance in High Pressure Die Casting, Department of Mechanical Engineering and Industrial Technologies, University of Firenze – Italy, Via di S. Marta, 3, 50139 Firenze, Italy, 2011.

- [5] CAMPBELL, J., *Castings Practice - The 10 Rules of Castings*, Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 200 Wheeler Road, Burlington, MA 01803, ISBN 07506 4791 4, Inglaterra, 2004.
- [6] DORUM, C., HOPPERSTAD, O. S., BERSTAD, T., DISPINAR, D., *Numerical Modeling of Magnesium Die-Castings Using Stochastic Fracture Parameters*, SINTEF Materials and Chemistry, Trondheim, Norway, Structural Impact Laboratory (SIMLab), Centre for Research-based Innovation, Department for Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2009.
- [7] HANGAI, Y., KITAHARA, S., *Quantitative Evaluation of Porosity in Aluminum Die Castings by Fractal Analysis of Perimeter*, *Materials Transactions*, Vol. 49, No. 4 (2008) pp. 782 to 786, Japan, 2008.
- [8] HANGAI, Y., KITAHARA, S., *Quantitative evaluation of porosity in aluminum alloy die castings by fractal analysis of spatial distribution of area*, *Materials and Design* 30 1169–1173 Department of Mechanical System Engineering, Gunma University, Kiryuu 376-8515, Gundai Co. Ltd., Isesaki 372-0854, Japan, 2009.
- [9] IRFAN, M., SCHWAM, D., KARVE, A., RYDER, R., *Improvements of Mechanical Properties in Die Cast Engine Blocks*. 114th Metalcasting Congress, FL: North American Die Casting Association, Orlando, EUA, 2010.
- [10] IWATA, Y., DONG, S., SUGIYAMA, Y., IWAHORI, H., *Effects of Solidification Behavior during Filling on Surface Defects of Aluminum Alloy Die Casting*, *Materials Transactions*, Vol. 54, No. 10 (2013) pp. 1944 to 1950, Japan Foundry Engineering Society, Toyota Central R&D Labs., Inc., Nagakute 480-1192, Japan, 2013.
- [11] JORSTAD, J.L., APELIAN, D., *High Integrity Die Castings (Sound, Reliable e Heat Treatable)*. Wheeling, IL: North American Die Casting Association, EUA, 2008.
- [12] JORSTAD, J., PAN, Q., APELIAN, D., *Interaction of Key Variables During Rheocasting: Effects of Fraction Solid and Flow Velocity on Performance*. 111th Metalcasting Congress. Houston, TX: North American Die Casting Association, EUA, 2007.
- [13] KLEIBER, M.; HIEN, T.D.; *The Stochastic Finite Element Method*. Chichester: Wiley. 1992.
- [14] KIM, H. H., LEE, S. M., KANG, C. G., *Reduction in Liquid Segregation and Microstructure Improvement in a Semisolid Die Casting Process by Varying Injection Velocity*, *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, DOI: 10.1007/s11663-010-9451-8, Pusan National University, Pusan, 609-735 Korea, 2011.
- [15] KIM, Y., KANG, C., CHO, J., JEONG, C., CHOI, S., HONG S., *Die Casting Mold Design of the Thin-walled Aluminum Case by Computational Solidification Simulation*. *Journal of Materials Science and Technology -shenyang-*; 24, 3; 383-388, Japan, 2008.
- [16] KITTUR, J. K., CHOUDHARI, M. N., PARAPPAGOUDAR, M. B., *Modeling and Multi-response Optimization of Pressure Die Casting Process Using Response Surface Methodology*, *Int J Adv Manuf Technol* 77:211–224 DOI 10.1007/s00170-014-6451-x, Springer-Verlag, London, 2014.
- [17] KIRKMAN, S., *Shrinkage Porosity: A Guide to Correcting the Problems*. Wheeling, IL: North American Die Casting Association, EUA, 2006.
- [18] MALAVAZI, J. *Área de fundição: Processo de fundição sob pressão*. Osasco: SENAI, Brasil, 2005.

- [19] MANCIN, S., ZILIO, C., CAVALLINI, A., ROSSETTO, L., Pressure Drop During Air Flow in Aluminum Foams, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Italy, 2012.
- [20] MENDES, R. P. K. Avaliação da influência dos parâmetros do processo de fundição sob pressão sobre a qualidade de uma peça injetada em liga de alumínio. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Brasil, 2005.
- [21] MILLER, R., An Extension to PQ Analysis: Selecting Die and Machine to Quantitatively Maximize Operating Flexibility. *CastExpo'10*, FL: North American Die Casting Association, Orlando, EUA, 2010.
- [22] MONROE, A., Modeling of Shrinkage Porosity in High Pressure Aluminum Die Castings. Wheeling, IL: North American Die Casting Association, EUA, 2009.
- [23] NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, *Die Materials & Technologies*. Wheeling, IL: North American Die Casting Association, EUA, 2011.
- [24] NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, *NADCA Product Specification Standards for Die Casting*. Wheeling, IL: North American Die Casting Association, EUA, 2009.
- [25] PROSKE, M., GADDAM, D., Autonomous Optimization: Determining the Process Window before Casting the First Part. *Die Casting Engineer*, North American Die Casting Assn. *Die Casting Engineer*; 53, 3; 22-25., EUA, 2009.
- [26] REIKHER, A., PILLAI, K. M., A Fast Simulation of Transient Metal Flow and Solidification in a Narrow channel. Part II. Model Validation and Parametric Study, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 60 (2013) 806–815, Albany-Chicago LLC, 7816 N. Regent Rd. Fox Point, WI 53217, Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, WI 53211, EUA, 2013.
- [27] ROBBINS, P., Vacuum Assisted Casting Answers Today's Market Needs – Vacuum Makes Possible the Bigger, More Complex Castings Now Wanted by Automakers, *Castool Tooling Systems*, ON, Canada, 2012.
- [28] SCHNEIDERBAUER, S., PIRKER, S., CHIMANI, C., KRETZ, R., Studies on Flow Characteristics at High-Pressure Die-Casting, *The 3rd International Conference on Advances in Solidification Processes*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 27 (2011) 012067, Austria, 2011.
- [29] SHOLAPURWALLA, S., & MATHIER, V., Optimizing the High Pressure Die Casting Process Using Computer Simulation; *CastExpo'10*. Orlando, FL: North American Die Casting Association, EUA, 2010.
- [30] STEEDMAN, G., BISHOP, D. P., CALEYW. F., KIPOUROS, G. J., Surface porosity investigation of aluminum-silicon PM alloys, *Materials Engineering Program, Department of Process Engineering and Applied Science*, Dalhousie University, 1459 Oxford Street, Halifax, NS, Canada, 2012.
- [31] TSOUKALAS, V. D. Optimization of Porosity Formation in AISi9Cu3 Pressure Die Castings Using Genetic Algorithm Analysis. *Materials and Design*, Department of Marine Engineering, Athens Merchant Marine Academy, Paralia Aspropyrgou 19300, Aspropyrgos, Athens, Greece, 2008.
- [32] UDDANWADIKER, R. V.; PADOLE, P. M.; ARYA, H.; Effect of Variation of Root Post in Different Layers of Tooth: Linear vs Nonlinear Finite Element Stress Analysis, *Journal Biosci Bioeng*; 104: 363-70, 2007.
- [33] VANDERESSE, N., MAIRE, E., CHABOD, A., BUFFIÈRE, J., Microtomographic study and finite element analysis of the porosity harmfulness in a cast aluminum alloy, *International Journal of Fatigue* 33 (2011) 1514–1525, Université de Lyon, INSA-Lyon, MATEIS CNRS UMR 5510, 69621 Villeurbanne, Centre Technique des Industries de la Fonderie (CTIF), France, 2011.

[34] VINARCIK, E. J., High Integrity Die Casting Processes, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, Includes index, ISBN 0-471-20131-6, die-casting. I. Title. TS239.V56 671.2 53 dc21, Canada, 2002.

[35] WILCZEK, A., DŁUGOSZ, P., HEBDA, M., Porosity Characterization of Aluminum Castings by Using Particular Non-destructive Techniques, J Nondestruct Eval (2015) 34:26 DOI 10.1007/s10921-015-0302-z, Institute of Materials Engineering, Cracow University of Technology, Warszawska 24, 31-155 Kraków, Polonium, 2015.

[36] ZUO, Y., LI, H., XIA, M., JIANG, B., SCAMANS, G. M., FAN, Z., Refining Grain Structure and Porosity of an Aluminum Alloy With Intensive Melt Shearing, LIME (EPSRC Centre for Innovative Manufacturing in Liquid Metal Engineering), BCAST, Brunei University, Uxbridge, Middlesex UB8 3PH, Reino Unido, 2010.