



OTIMIZAÇÃO DE MATRIZ DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO USANDO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Eduardo Felipe dos Santos, edu.felipedossantos@gmail.com

Professor orientador: Lisiane Trevisan, lisiane.trevisan@farroupilha.ifrs.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95180-000, Farroupilha – RS

Resumo: O processo de injeção sob-pressão em matrizes metálicas (*high pressure die casting* ou *HPDC*) é um processo de fundição com capacidade de produzir peças metálicas com tolerâncias dimensionais baixíssimas e alta qualidade de fundido. O presente trabalho demonstra uma metodologia de otimização de um projeto de matriz para uma polia de alumínio SAE 306. A metodologia adotada é baseada em um sistema interativo de projeto entre CAD e CAE, onde utilizou-se o software de simulação numérica Magmasoft para prever os resultados associados a qualidade do fundido. Adotou-se critérios de qualidade para a aprovação do projeto e analisou-se os resultados da simulação relacionados a cada critério. Foram relacionados parâmetros de entrada do processo, como o início da segunda fase de injeção, com os resultados de simulação, nos quais demonstraram uma relação direta entre altas velocidades de enchimento e turbulência com o aumento da probabilidade de aparecimento de porosidades.

Palavras-chave: HPDC, injeção, simulação, Magmasoft

1. INTRODUÇÃO

O processo de injeção metálica em matrizes é um processo de fabricação para produção de peças metálicas com dimensões precisas e bem definidas, podendo produzir peças com superfícies lisas ou texturizadas. É alcançado pela injeção de metal líquido a uma velocidade e pressão relativamente altas em matrizes de aço reutilizáveis. Trata-se de um processo de fundição, no qual o metal líquido é injetado em molde permanente. Este processo é conhecido internacionalmente como *die casting*, e pode designar tanto o processo quanto o produto final. Pode ser classificado em HPDC ou LPDC, *high pressure die casting* ou *low pressure die casting*, respectivamente. Neste trabalho o processo em foco é o HPDC (Andresen, 2005).

Comparado com outros processos de fundição, o HPDC tem uma velocidade e pressão muito mais altas durante o enchimento do molde ou matriz. Esta velocidade alta resulta em uma condição de escoamento turbulento dentro dos canais de enchimento. Além da própria velocidade de enchimento, o processo de injeção em matrizes permanentes tem uma produtividade muito maior do que processos de fundição em moldes não permanentes. Em contraste com a fundição em areia, por exemplo, que necessita de um novo molde para cada enchimento, o processo de injeção em matriz permanente pode usar a mesma matriz de aço inúmeras vezes, antes de ser substituída. Além da produtividade, o HPDC é o processo de fundição que alcança as dimensões e tolerâncias dimensionais mais precisas (Andresen, 2005).

A matriz de aço onde o metal é injetado contém cavidades que formam as peças metálicas. Estas cavidades possuem a forma externa da peça desejada. O processo é cíclico, e geralmente uma matriz tem a capacidade de produzir milhares de peças em rápida sucessão antes de ser removida do processo. Durante a aplicação, a matriz é montada rigidamente em uma máquina de injeção metálica, chamada de injetora. A parte principal da matriz fixada a injetora é chamada de matriz cavidade enquanto a segunda parte da matriz (parte móvel) é chamada de matriz de extração ou macho (Andresen, 2005).

O ciclo de injeção se inicia quando as duas partes da matriz são presas fixamente uma na outra pelo mecanismo de fechamento da máquina de injeção. O metal líquido é então injetado na matriz com alta velocidade e pressão. Após a injeção o metal se solidifica rapidamente dentro da matriz. A matriz então abre-se, através dos mecanismos da máquina de injeção, e toda a árvore metálica (composta pela peça, canais e outros componentes) são extraídos (Andresen, 2005).

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a apresentação de um desenvolvimento de projeto de sistema de alimentação de uma matriz que tenha a capacidade de produzir uma peça de alumínio com igual ou maior rendimento metálico e produtividade do que sua concepção inicial, sem que houvesse prejuízo a qualidade do produto. A matriz projetada foi baseada em uma

matriz já existente, portanto foi um projeto de otimização. O objetivo foi duplicar o número de peças produzidas durante um ciclo de injeção e manter ou melhorar o rendimento metálico. Para cumprir com estes objetivos foi adotada uma metodologia de projeto baseada na otimização do sistema através de simulação numérica por elementos finitos.

A peça que teve sua matriz de injeção otimizada é uma polia de alumínio, conforme Fig. 1:



Figura 1. Polia de alumínio fundido. Desenhado no software Solid Works.

A polia de alumínio tem sua aplicação na transmissão de movimento mecânico. Os fatores de qualidade do produto mais importantes a serem considerados são a exatidão dimensional e a sanidade interna. A exatidão dimensional é atendida quando projeta-se uma correta adição de volume nas cavidades, para compensar a contração volumétrica do alumínio quente. A sanidade interna é um requisito de qualidade demandado pelo cliente, que se relaciona com defeitos internos, como porosidades. Uma boa sanidade interna garante um produto capaz de atender a aplicação para qual foi projetado sem o risco de falhas estruturais. O correto dimensionamento do sistema de alimentação da matriz é requisito fundamental para promover uma peça com boa sanidade interna.

Estes requisitos de qualidade são atendidos na matriz atual da polia, e comprovados através dos resultados obtidos da utilização desta pelo cliente. O aumento da produtividade foi alcançado através de um projeto de matriz onde as atuais duas cavidades foram duplicadas para quatro, desta forma duplicando a produtividade do cliente.

Para comprovar que as alterações no projeto não resultarão em nenhum prejuízo na qualidade do produto, foi utilizado o software de simulação numérica MagmaSoft para simular o processo de enchimento e solidificação do alumínio. Através do software foi possível a análise dos resultados da simulação, que também serão mostrados neste trabalho, e pela análise dos resultados aprovou-se o novo projeto de matriz.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A matriz e o processo de injeção podem ser analisados à partir de dois aspectos que ocorrem simultaneamente, mas que podem ser separados para a melhor compreensão, análise e controle dos projetos e processos: recursos mecânicos ou hidráulicos e sistemas térmicos. Nos sistemas hidráulicos são analisados o escoamento do metal através dos canais de enchimento e distribuição (*runners*), sendo o processo mais relacionado a etapa de enchimento da matriz. O sistema térmico existe para analisar as trocas térmicas envolvendo o metal líquido a altas temperaturas e a matriz de injeção, tendo relação intrínseca com o processo de solidificação do alumínio na matriz. Neste sistema também são desenvolvidos o sistema de refrigeração da matriz (Andresen, 2005).

Classificam-se os processos de injeção sob-pressão através da temperatura da câmara de injeção. Processos nos quais as injetoras mantêm o metal aquecido na câmara de injeção e este é injetado diretamente na matriz são chamados de injeção por câmara quente. Processos em que o metal é despejado manualmente na câmara de injeção e a injetora atua o pistão após o enchimento manual da bucha de injeção são chamados de injeção por câmara fria (Verran, 2000).

Segundo Oliveira e Galhardi (2016), a descrição de processos de fundição em modelos físico-matemáticos é o que permite os cálculos utilizados em software de simulação numérica, e isto implica na quantificação de parâmetros e etapas do processo, assim como na medição de seus impactos na qualidade do fundido. As equações (1), (2), (3) e (4) são relacionadas com os fenômenos ocorridos durante a injeção, sendo estes pertencentes aos sistemas térmicos (transferência de calor) e hidráulico (fenômenos de transporte) (Kwon, 2018):

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

Equação de Navier-Stokes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j U_i) = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i \quad (2)$$

Equação da energia:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho C_p U_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q \quad (3)$$

Equação do volume de um fluido (VOF):

$$\frac{dF}{dt} + U_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0; \quad 0 \leq F \leq 1 \quad (4)$$

Onde:

- t – tempo (s)
- x – distância (m)
- p – densidade (Kg/m³)
- u – viscosidade cinemática (m²/s)
- g – gravidade (Kgf)
- Cp – capacidade térmica (J/K)
- λ – condutividade (W/m²K)
- F – volume (m³)
- U – velocidade (m/s)
- T – temperatura (°C, K)
- Ts – temperatura solidus (°C, K)
- Q – calor (W)

A simulação numérica pelo método dos elementos finitos (FEM) constitui o método de iteração mais comum utilizado na maioria dos programas de simulação. As simulações por FEM têm o potencial de produzir resultados mais assertivos através de potentes ferramentas computacionais. Contudo, para isso, os parâmetros introduzidos no software precisam representar fidedignamente os fenômenos envolvidos no processo (Ravi e Srinivasan, 1996).

Geralmente, as etapas típicas para a execução de uma simulação consistem em (Ravi e Srinivasan, 1996):

- modelação do sólido num software CAD;
- geração da malha, formada por elementos geométricos como cubos, e em FEM por elementos como triângulos e retângulos;
- seleção do material e definição de uma base de dados com as propriedades térmicas e físicas;
- especificação de condições fronteira como coeficientes de transferência de calor com moldação, ar e arrefecedores;
- processamento dos *inputs*;
- pós-processamento para visualizar os resultados (como tempo de solidificação e porosidade), normalmente apresentados sob a forma de um conjunto de gráficos com códigos de cores.

É importante saber quais parâmetros são *inputs* de simulação e de que forma pode-se alterá-los. Importante ressaltar que todos os parâmetros relacionados ao ciclo de injeção e a injetora são *inputs* de sistema. O ciclo de injeção ocorre quando a matriz é fixada na injetora e é composto cronologicamente por (Kwon, 2018):

- 1) Matriz aberta, pronto para iniciar um novo ciclo
- 2) A matriz é fechada
- 3) O metal líquido quente é injetado na matriz pelo pistão da injetora
- 4) A matriz é mantida fechada enquanto ocorre a solidificação catalisada pelo sistema de arrefecimento
- 5) A matriz é aberta e a árvore metálica é extraída
- 6) São aplicados spray desmoldantes e/ou jatos de ar para limpeza e resfriamento

A etapa 3 é talvez a mais crítica de todo o ciclo de injeção, pois é nesta que efetivamente é injetado o metal. Por sua vez, o processo de injeção do metal quente é realizado pela injetora em 3 fases distintas. As configurações de *set-up* destes 3 processos na injetora são correspondentes a 3 *inputs* no software com grande importância e impacto na qualidade final do produto. São estes (Verran e Mendes, 2006):

- Primeira fase: velocidade lenta de injeção. É a velocidade correspondente do pistão antes do metal líquido chegar a cavidade, passando apenas pelos canais. A primeira fase pode encerrar-se quando o metal líquido chega no limiar da cavidade ou, como definido por alguns autores, pode ser em função do percentual de enchimento da bucha de injeção. Velocidades muito altas durante esta fase podem provocar turbulência na câmara de injeção, criando a tendência para oxidação e aprisionamento de ar pelo metal líquido. Estas características podem resultar em porosidades e inclusões no fundido. Recentes estudos tem corroborado esta

mesma relação entre velocidade e porosidades, sendo uma relação diretamente proporcional (Dargusch, *et al*, 2006). Como *input* de simulação, deve ser definida a velocidade do pistão na primeira fase.

- Segunda fase: velocidade alta de injeção. É a velocidade correspondente do pistão para o enchimento da peça ou cavidade. Em relação a primeira fase, assemelha-se mais a um disparo do pistão do que a um movimento suave. Esta velocidade determina o tempo de enchimento da peça e a velocidade crítica nos *gates*. Velocidades muito baixas nesta fase podem resultar em peças com junta fria ou falhas de preenchimento. Em contrapartida, velocidades muito altas podem causar porosidades na peça por aprisionamento de ar. Esta velocidade deve ser definida como *input* para a simulação, juntamente com o parâmetro de início da fase.
- Terceira fase: pressão de recalque ou compactação. É a pressão aplicada pelo pistão ao sistema enquanto ocorre a solidificação da árvore metálica dentro da matriz. Neste estágio, todas as cavidades da matriz estão completamente preenchidas. Esta pressão é responsável por compactar a peça, impedindo a expansão de gases e diminuindo a tendência de porosidades por contração volumétrica. Em recente estudo, Dargusch, *et al*, (2006), demonstraram que a presença de porosidades na peça é inversamente proporcional a pressão de compactação. É importante que esta pressão ocorra na peça enquanto o caminho até a cavidade esteja composto por metal ainda líquido, em fase de solidificação. Caso ocorra a solidificação prematura do canal, a pressão de compactação não conseguirá atuar onde é necessário uma maior compactação, que é na peça ou cavidade, podendo resultar em porosidades nas peças. A pressão é um parâmetro *input* e deve ter seu valor definido.

Além das 3 fases de injeção do metal, existem outros componentes do projeto da matriz com igual ou até maior importância para a qualidade final do fundido: trata-se do *design* e dimensionamento do sistema de alimentação. O sistema de alimentação é o conjunto de canalização responsável por conduzir o metal líquido da bucha de injeção até a cavidade, e da cavidade até as bolsas. Pode ser dividido em bolacha (*biscuit*), canal de distribuição (*runner*), canal de ataque (*gate*) e bolsas (*overflows*), conforme Fig. 2:

- Canal de ataque: elemento final de ligação entre o sistema de canais e a cavidade (peça).
- Canal de distribuição: elemento de ligação entre a bolacha e o ataque. Geralmente compõe a parte mais longa do sistema de alimentação
- Bolsa: responsável por coletar o primeiro metal que chega nas cavidades, sendo este o que possui maior probabilidade de conter impureza ou ar aprisionado
- Bolacha: diferença entre o comprimento total da bucha de injeção e o curso do pistão da injetora.
- Vents: são saídas de ar e podem ser projetados de várias formas diferentes. Geralmente atrelam-se as saídas de ar nas bolsas. Parte auxiliar do sistema de alimentação que não tem o propósito de conduzir o metal. São de grande importância para a prevenção da ocorrência de porosidades por aprisionamento de ar.

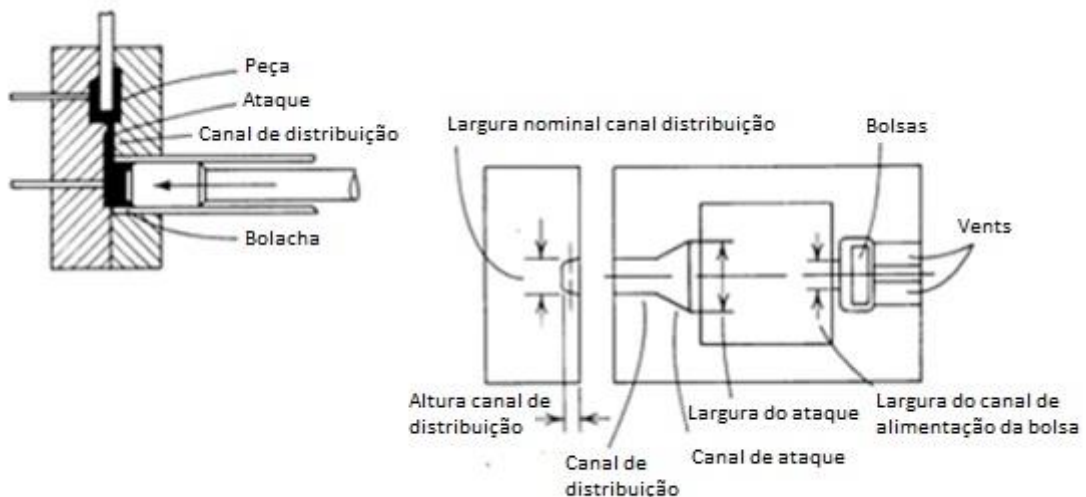


Figura 2. Desenho esquemático dos componentes de um sistema de alimentação (Sully, 1992)

Sabendo que rendimento metálico ou metalúrgico é a razão entre o peso das peças e o peso total injetado (peças + sistema de alimentação), quanto maior o rendimento, menor o desperdício de energia durante o processo. Após a extração (etapa 5 do ciclo de injeção) o sistema de alimentação deve ser removido e geralmente é reutilizado como insumo para novas fusões de ligas.

A geometria, *design* e *lay-out* do sistema de alimentação são críticos para a produção de uma peça de qualidade. Perda excessiva de calor, turbulência excessiva e erosão da matriz são problemas que podem ser evitados quando projetam-se os *runners* de forma a respeitar alguns princípios hidráulicos e termodinâmicos. Típicos *runners* são redondos ou quase quadrados para minimizar a perda de calor através da superfície. O *gate* é o elemento de controle para a injeção da peça.

Geralmente a área da secção transversal do *gate* é a menor de todo o sistema, dessa forma pode-se controlar o tempo de enchimento da peça de forma mais efetiva (Sully, 1992).

Segundo Andresen (2005), a área do *gate* possui uma grande influência em diversos fatores do processo. Pode-se observar na Tab. 1 o quanto a variação desta variável pode impactar em outros parâmetros e características:

Tabela 1. Características que são função da área do gate (Andresen, 2005)

Área pequena do <i>gate</i>	Característica do processo influenciada	Área grande do <i>gate</i>
Menor probabilidade	Porosidade por gás	Maior probabilidade
Melhor	Acabamento superficial	Pior
Pior	Desgaste da matriz	Melhor
Melhor	Propriedades mecânicas peça	Pior

Os elementos do sistema de alimentação foram analisados do decorrer deste trabalho, no que tange a metodologia e resultados da simulação.

4. METODOLOGIA

Para a concepção de um bom projeto de matriz de injeção, alguns aspectos fundamentais devem ser reconhecidos, analisados e controlados. Para tanto, algumas considerações iniciais devem ser feitas. Foram adotadas as seguintes considerações iniciais segundo Andresen (2005):

- O fluido injetado dentro da matriz comporta-se como um fluido hidráulico, já que ele é injetado a altas temperatura, velocidade e pressão.
- O metal líquido escoar em linha reta até encontrar uma obstrução ou parede. O fluido sempre escoar pelo caminho de menor resistência.
- O processo de injeção em matriz é um processo de escoamento turbulento, já que o metal líquido é injetado em velocidades muito altas.

A alteração do projeto da matriz iniciou-se pelo *design* do novo sistema de alimentação. Neste projeto, foi considerado o processo de injeção por câmara fria, que é o utilizado pelo fundidor. Esta análise inicial foi importante pois o *design* dos canais possuem características e limitações diferentes para os respectivos tipos de processos. No caso da injeção por câmara fria, por exemplo, não é possível haver aberturas ou canais de enchimento abaixo da bucha de injeção, pois o metal líquido iria vazar sem pressão para as cavidades. Tendo em vista esta limitação, foi possível realizar um projeto preliminar dos canais de enchimento e *gates*.

Utilizou-se o software de CAD (*computer aided design*) Solid Works para o *design* e projeto do sistema de alimentação. Para executar as simulações numéricas, utilizou-se o software de CAE (*computer aided engineering*) Magmasoft.

O método de desenvolvimento dos canais de alimentação utilizado neste trabalho foi um método iterativo e de evolução progressiva. A iteratividade é aqui definida como um ciclo de simulação no qual os resultados obtidos na simulação precedente servem como informações de entrada para a simulação sucedente. Esta iteração pode ser melhor visualizada no fluxograma da Fig. 3:

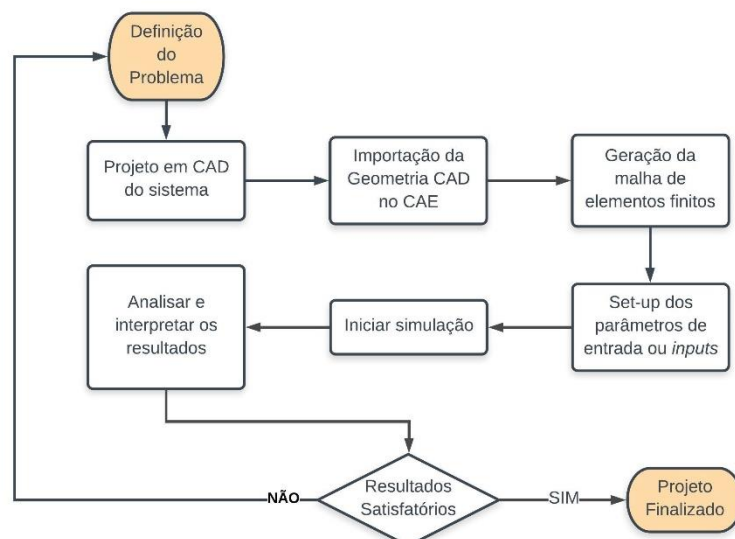


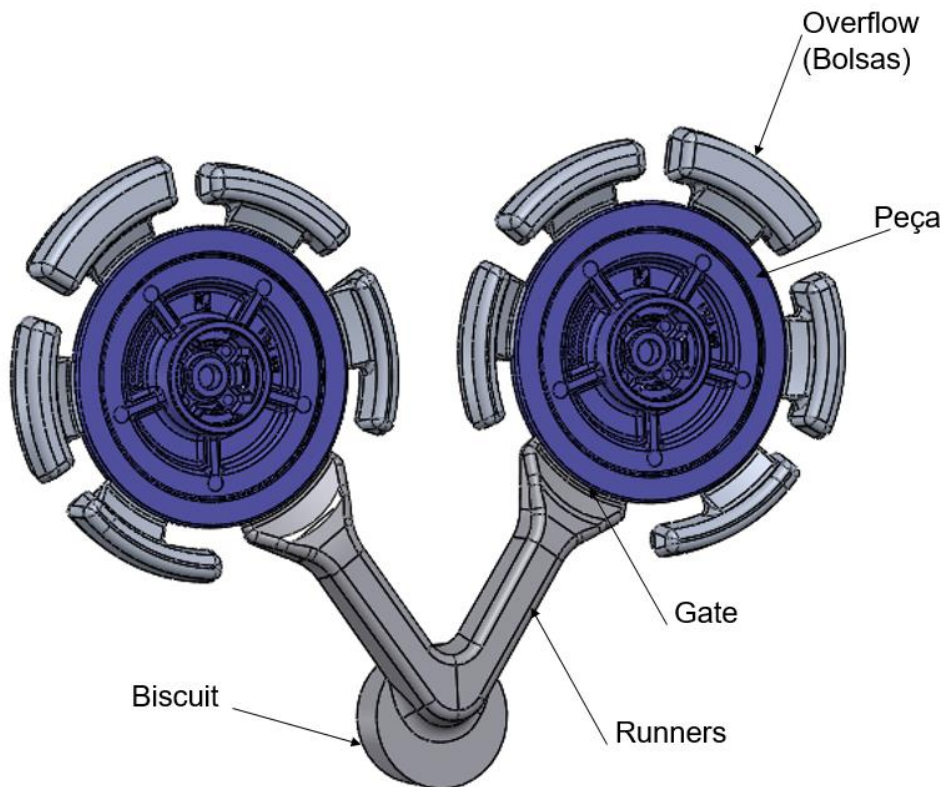
Figura 3. Fluxograma representando a iteratividade do projeto. Fonte própria

Já a evolução progressiva foi empregada pois os modelos foram simulados desde suas concepções mais simples até as mais complexas, possibilitando o ajuste do projeto em diferentes camadas de complexidade. Conforme visualiza-se no fluxograma, para finalizar-se o projeto é necessário que este atenda através de simulação aos requisitos de aprovação necessários. São listados abaixo todos os parâmetros necessários adotados neste trabalho para a aprovação do projeto (Fuoco, 2006):

1. Rendimento metálico $\geq 30\%$;
2. Baixa probabilidade de presença de porosidades por bolhas de ar na peça;
3. Baixa probabilidade de presença de porosidades por contração volumétrica na peça;
4. Baixa probabilidade de presença turbulência excessiva no escoamento;
5. Simetria de enchimento das cavidades;
6. Velocidade no *gate* = V_g ; Sendo $V_g \leq 60$ m/s;
7. Tempo de solidificação do *gate* = T_g ; Tempo de solidificação total da peça = T_p ; Sendo $T_g \geq 0,5.T_p$;
8. Baixa probabilidade de presença de junta fria;

Atendidos estes requisitos de qualidade, e demonstrados através de resultados na simulação, o projeto encontra-se aprovado.

Como trata-se de um projeto de otimização, boa parte do *design* e concepções do projeto atual foram incorporados no novo projeto. Dessa forma, não foi necessário o cálculo da área de *gates*, *runners* e volume de *overflow*. A Fig. 4 apresenta a imagem do projeto original:

**Figura 4. Vista isométrica do projeto do sistema de alimentação atual. Desenhado em Solid Works**

Portanto, optou-se por manter certos elementos do projeto antigo no novo, porque sabe-se através de testes de qualidade na peça fabricada atualmente que esta encontra-se com os requisitos de qualidade satisfatórios. Os elementos que foram mantidos foram o *gate* (secção e ponto de ligação) e *overflows* (distribuição e volume total). Dessa forma, houve a necessidade de dimensionar-se apenas os *runners* e o *biscuit*. Como a menor área do sistema deve ser a do *gate*, o *runner* deve ter uma área de secção transversal maior que a do *gate*. Foi adotada a Eq. 5 para o dimensionamento do *runner* para o nível de pressurização adequado ao sistema, definindo as relações de áreas “Ar”, do *runner*, e “Ag” do *gate*:

$$A_r = 1,1.A_g \quad (5)$$

Assumindo-se estas considerações iniciais, deu-se início ao projeto otimizado do sistema. Uma das vantagens da simulação, é que se outrora o desenvolvimento de projeto se dava no âmbito da tentativa e erro, tendo o erro um custo

muito grande, já que resultava em um produto, a simulação possibilita uma abordagem parecida, porém em uma plataforma virtual, não tendo o ônus do erro como um peso de custo de fabricação. A Fig. 5 mostra o primeiro *design* do novo sistema de alimentação:

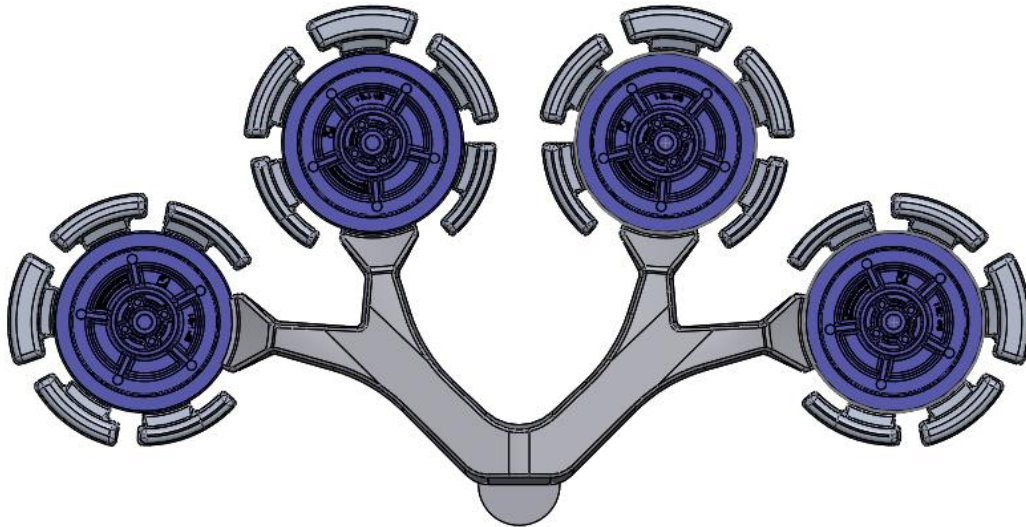


Figura 5. Vista de topo do projeto do sistema de alimentação versão 01. Desenhado em Solid Works.

A concepção da versão 01 também tem a função de se estimar a área superficial projetada total das cavidades, cuja função é calcular a força de fechamento da injetora. Uma consequência inevitável ao novo projeto é o aumento total da área superficial total das cavidades dentro da matriz. Considerando que a pressão exercida pela injetora durante a pressão de compactação é constante, e considerando a complexidade geométrica da polia, requisitos de qualidade e aplicação, adotou-se a pressão de compactação máxima indicada de 1000 kgf/cm². A Tab. 2 mostra diferentes valores de pressão de acordo com características da peça:

Tabela 2. Valores de pressão de compactação (Verran, 2000)

Aplicação da Peça	Pressão de Compactação Recomendada (kgf/cm ²)
Peças com pouca sollicitação mecânica (standard)	200 a 400
Peças técnicas com exigência mecânica	400 a 600
Peças estanques, grandes áreas e/ou paredes finas	600 a 1000

Com os valores conhecidos de pressão de compactação e área superficial projetada obtida através do modelamento 3D, foi possível conhecer uma terceira variável, que é a força de fechamento exercida pela máquina injetora. A força de fechamento “F” pode ser conhecida através da Eq. (6) (Verran, 2000):

$$F=1,1.A.P \quad (6)$$

Sendo “A” (cm²) a área projetada total das cavidades dentro da matriz e “P” (kgf/cm²) a pressão específica (pressão de compactação) exercida pelo pistão da máquina. É de suma importância conhecer a força de fechamento pois é esta variável que vai indicar o tipo e modelo da máquina injetora utilizada com a matriz desenvolvida neste trabalho. As injetoras são comercialmente conhecidas através de sua marca e sua capacidade, geralmente descrita em toneladas. A capacidade da injetora indica qual a força máxima de fechamento que a injetora suporta, encontrada através da Eq. (6). Com a pressão de compactação e a injetora definidas, é possível ajustar a área interna da bucha de injeção e seu comprimento, definindo-se assim o elemento faltante do sistema de alimentação, o *biscuit*.

Definido o modelamento 3D da versão 01 e a capacidade da injetora, procedeu-se para o início da etapa do uso do CAE. Para realizar a primeira simulação, o primeiro passo após importar a geometria para dentro do Magmasoft é a geração da malha dos elementos finitos. A Fig. 6 apresenta uma composição de imagem da malha gerada no Magmasoft. Na Tab. 3 encontram-se as configurações de malha adotadas:

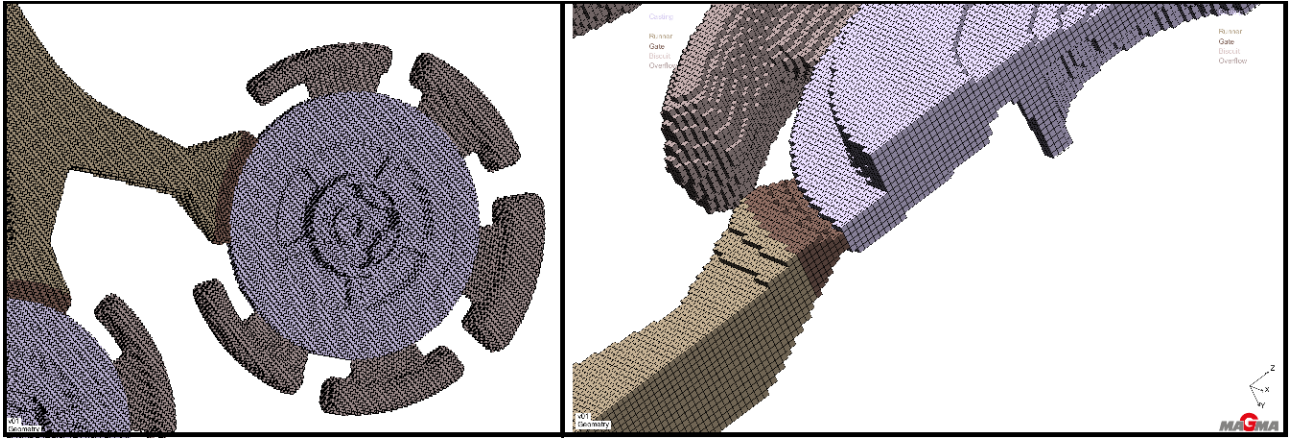


Figura 6. Detalhe da malha de elementos finitos da versão 01. Imagem gerada pelo Magmasoft.

Tabela 3. Valores referentes a malha de elementos finitos.

Característica	Valor
Quantidade total de elementos finitos	20 693 675
Quantidade total de elementos pertencentes ao sistema de alimentação	993 178
Volume mínimo de elemento do sistema de alimentação	1 mm ³
Volume mínimo de elemento da matriz	8 mm ³

Após a transformação do modelo 3D para um modelo composto em elementos finitos, antes de executar a simulação foi necessário inserir todos os parâmetros de entrada ou *inputs* para realizar a simulação. A Tab. 4 mostra os elementos constituintes da composição química da liga de alumínio simulada. Na Tab. 5 encontram-se todos os outros *inputs* utilizados na primeira simulação:

Tabela 4. Parâmetros referentes a liga de alumínio simulada.

Composição Química Alumínio SAE 306 – Al Si9 Cu3	%
Cobre (Cu)	3,00
Ferro (Fe)	1,20
Magnésio (Mg)	0,30
Manganês (Mn)	0,40
Níquel (Ni)	0,40
Silício (Si)	9,00
Zinco (Zi)	1,00

Tabela 5. Demais inputs necessários para simulação.

Input	Valor
Liga de alumínio	Al 306
Temperatura inicial do alumínio	620°C
Temperatura inicial da matriz	190°C
Temperatura <i>Liquidus</i>	578°C
Temperatura <i>Solidus</i>	479°C

Liga da matriz	X40CrMoV
Ciclo de injeção onde se gravarão os resultados	5° ciclo
Capacidade Injetora	1000 toneladas
Área superficial total das cavidades	790 cm ²
Diâmetro do <i>biscuit</i>	70 mm
Comprimento bucha de injeção	621 mm
Percentual de preenchimento da bucha de injeção	43 %
Velocidade primeira fase	0,3 m/s
Início da segunda fase	Quando o metal chegar no <i>gate</i>
Velocidade da segunda fase	4,5 m/s
Pressão de compactação	1000 kgf/cm ²
Tempo de compactação	11s
Abertura da matriz	quando t=18s
Tempo de extração	4s
Tempo total de ciclo de injeção	48s

Definidos todos os parâmetros de entrada, deu-se início a primeira simulação. Foram realizadas o total de quatro simulações, porém de acordo com a metodologia empregada e mostrada no fluxograma da Fig. 3, as simulações subsequentes a primeira só puderam ser definidas após a análise dos resultados e delimitação dos problemas encontrados na primeira simulação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dentre os oito requisitos de qualidade postulados para a aprovação do projeto, a versão 01 atendeu 6 deles. Para uma primeira abordagem considerou-se um resultado satisfatório. A versão 01 não atendeu aos requisitos 4 e 5, turbulência excessiva e simetria de enchimento, respectivamente.

Um dos resultados utilizados para a verificação da turbulência no Magmasoft, é o resultado de enchimento visualizado através de partículas. A imagem abaixo mostra uma zona no início do canal de distribuição, em que o resultado de partículas indicou a presença de vórtices. Este elemento é característico para a identificação de turbulências no enchimento:

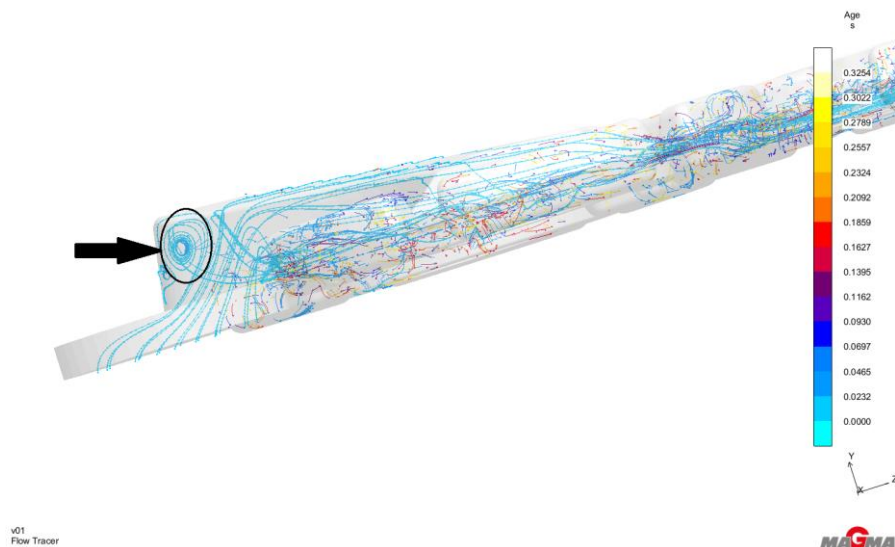


Figura 6. Vista de perfil do sistema de canais versão 01, durante o enchimento. Imagem extraída do Magmasoft.

Na Fig.6 visualiza-se o vórtice (indicado pela flecha) criado logo abaixo do *biscuit*. Na extremidade direita da imagem visualiza-se uma escala de cores, do azul até o amarelo. Esta escala de cores é característica do Magmasoft, e serve para facilitar a identificação dos elementos baseado em alguma característica de controle. No caso deste resultado, a característica de controle é a idade do material (*age*), ou o tempo de cada partícula após o início da injeção. Pela imagem, os pontos e linhas azuis correspondem a partículas recém injetadas, enquanto conforme sobe-se na escala, visualiza-se partículas que foram injetadas há mais tempo. O fato de o vórtice apresentar-se no início da injeção, conforme identifica-se pela cor azul clara das partículas, é um agravante da turbulência, pois caso ocorra oxidação ou o aprisionamento de bolhas de ar, essa contaminação pode ser levada em grande escala para todo o resto do sistema de alimentação com mais facilidade. Como solução a este problema, na próxima simulação foi alterada a geometria do canal naquele ponto, reduzindo o volume onde se cria o vórtice e criando um raio na geometria para conduzir melhor as partículas.

O outro critério de qualidade não atendido foi o enchimento simétrico das cavidades. O Magmasoft mostra o enchimento de forma precisa, podendo cada milissegundo após a injeção ser analisado. Na Fig. 7 identifica-se o problema mencionado na primeira simulação:

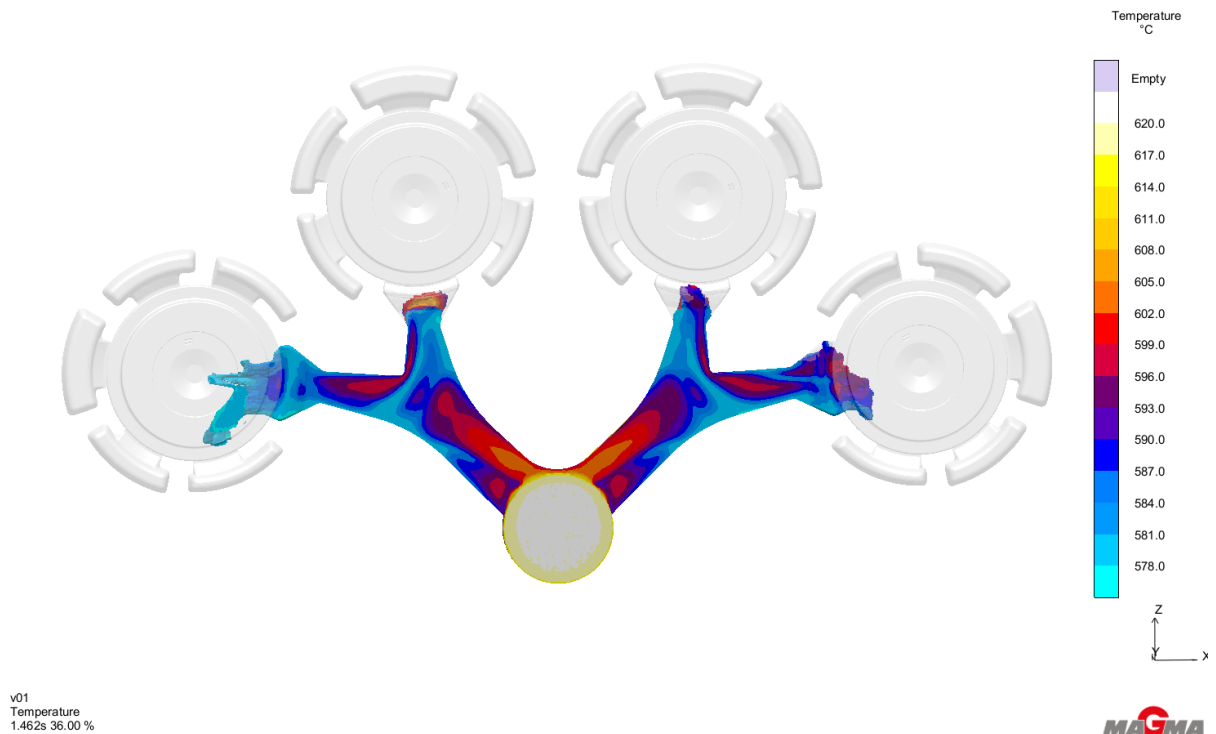


Figura 7. Vista de topo do sistema de canais versão 01, durante o enchimento. Imagem gerada pelo Magmasoft

A Fig. 7 trata-se de um congelamento do enchimento do tempo de 1,462s, nela verifica-se que o material está chegando primeiro nas cavidades da extremidade do que nas cavidades do centro. A escala de cores representa a temperatura do material neste instante, novamente variando do menor valor para o maior na escala de cores. Analisando a geometria dos canais, percebe-se que as distâncias entre o *biscuit* e os *gates* não são as mesmas. O canal ligado as cavidades das extremidades é ligeiramente maior que o canal que liga ao centro. A forma da distribuição dos canais também favorece inercialmente que o metal chegue primeiro as cavidades das extremidades, já que o ângulo para o caminho do centro, em relação ao canal de distribuição vindo do *biscuit* é mais acentuado do que o ângulo formado para o direcionamento das extremidades. De acordo com essa análise, na próxima simulação houve uma alteração na geometria, com o intuito de deixá-la mais isométrica, em relação a linha de centro principal do canal de distribuição.

Para a próxima simulação, versão 02, alterou-se a geometria dos canais, conforme mostra Fig.8 e Fig. 9 (versão 01 à esquerda e versão 02 à direita):

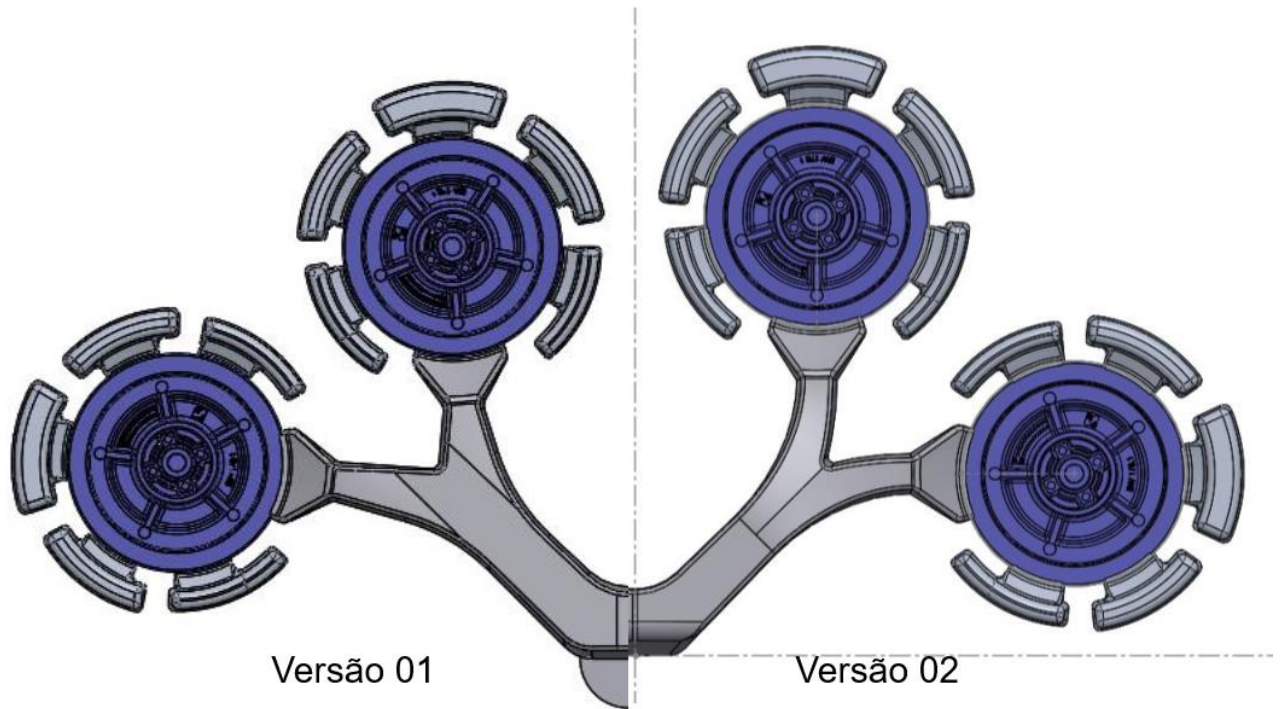


Figura 8. Vista de topo do sistema de canais versão 02. Desenhado em Solid Works.

Observa-se na Fig. 8 que foi inserida uma curvatura maior nos canais que ligam o ramo principal do canal de distribuição as cavidades na versão 02. Para respeitar o conceito proposto nessa versão, tanto o canal que liga a cavidade da extremidade quanto o do centro possuem a mesma curvatura, comprimento e angulação em relação ao ramo saindo do *biscuit*. Na Fig. 9 visualiza-se o canal em corte, no ponto específico onde houve alteração na geometria para evitar turbulência. Foi aumentado o raio e a inclinação do canal.

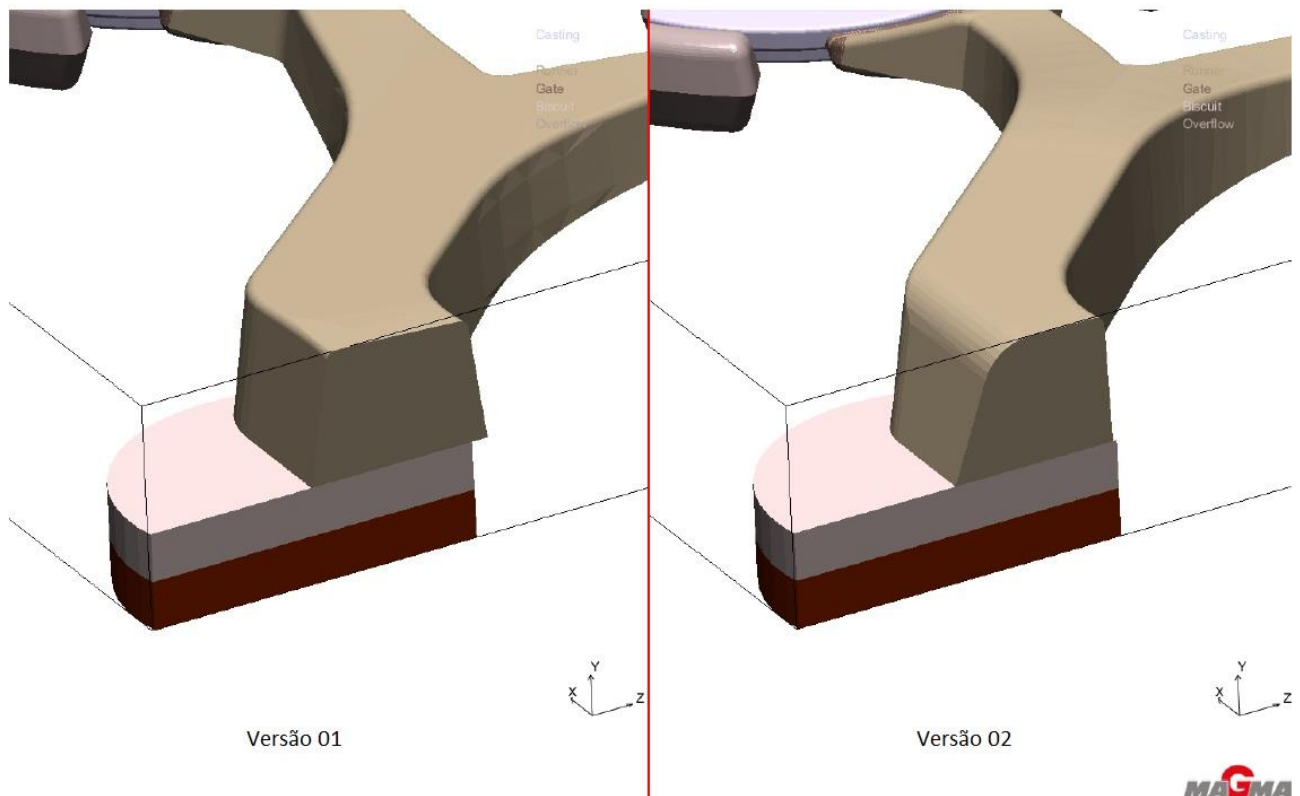
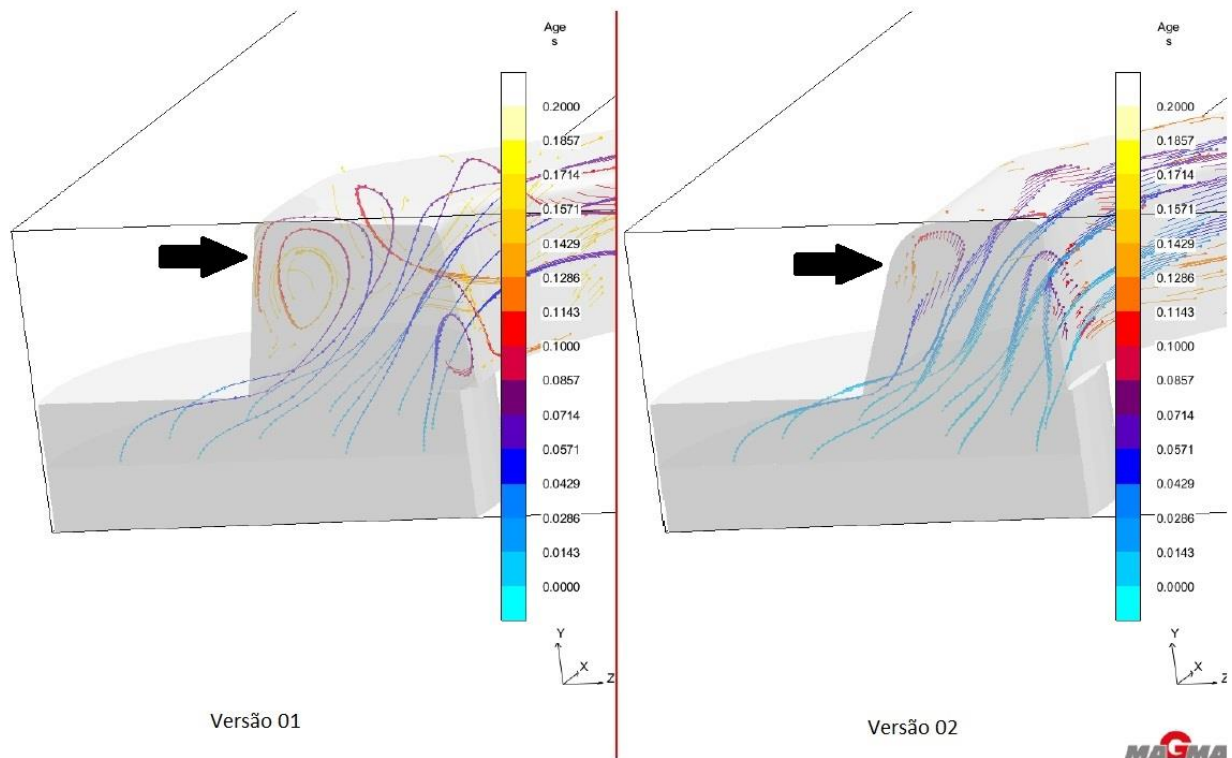


Figura 9. Detalhe da alteração do raio no runner. Versão 01 e 02 respectivamente.

Verifica-se na Fig. 10 uma comparação dos resultados obtidos nas simulações das versões 01 e 02:

**Figura 10. Diferença de turbulência na extremidade do runner. Versão 01 e 02 respectivamente.**

Ao comparar-se os resultados de enchimento das versões 01 e 02, verifica-se uma melhora significativa na condição de escoamento, com uma redução considerável da turbulência. Isso fica evidente ao comparar-se ambas as imagens da Fig. 10 na extremidade superior esquerda do runner (indicado pela flecha), onde nota-se que os vórtices existentes na versão 01 praticamente deixaram de existir na versão 02. A alteração proposta na geometria para corrigir a turbulência excessiva obteve sucesso.

Quanto ao enchimento sob o critério da simetria de enchimento, a versão 02 não obteve um resultado tão bom quanto esperado. Apesar da geometria ter sido redesenhada e estar simétrica, a simulação mostra que as cavidades das extremidades continuam recendo o metal primeiro que as do centro, provavelmente por causa da inércia do enchimento.

Para atender este critério de qualidade, foram feitas várias simulações em sequência. A geometria do sistema não foi alterada, porém foram feitas alterações referentes aos parâmetros envolvidos no enchimento, em particular em relação ao início da 2ª fase. Na Tab. 6 encontram-se estes dados tabelados:

Tabela 6. Parâmetros de simulação por versão.

Versão	Parâmetro de simulação alterado
01	Simulação inicial
02	Geometria
03	Início segunda fase: bucha de injeção cheia
04	Início segunda fase: posição média entre a bucha ficar totalmente cheia e o metal chegar na gate

Na Fig.11 verificam-se os dados da Tab.6 plotados em gráfico, para a melhor visualização do início da segunda fase. Sendo no eixo das ordenadas a velocidade do pistão em “m/s” e no eixo das abscissas a posição do pistão no seu curso de 0 a 601,2 mm. A curva em vermelho corresponde a velocidade do pistão em diferentes posições. Quando o pistão chega na posição 601,2mm toda a cavidade da matriz está preenchida. A linha vertical em verde corresponde ao momento em

que a bucha ou câmara de injeção está completa. A linha vertical em azul corresponde ao tempo onde o metal chega no *gate* dentro da matriz. Verifica-se que na versão 02 o aumento de velocidade característico ao início da segunda fase encontra-se quando o metal chega no *gate*. Na versão 03 o início da segunda fase acontece no momento em que a bucha de injeção encontra-se com seu preenchimento máximo. Na versão 04 a segunda fase acontece na posição intermediária entre os dois parâmetros de controle.

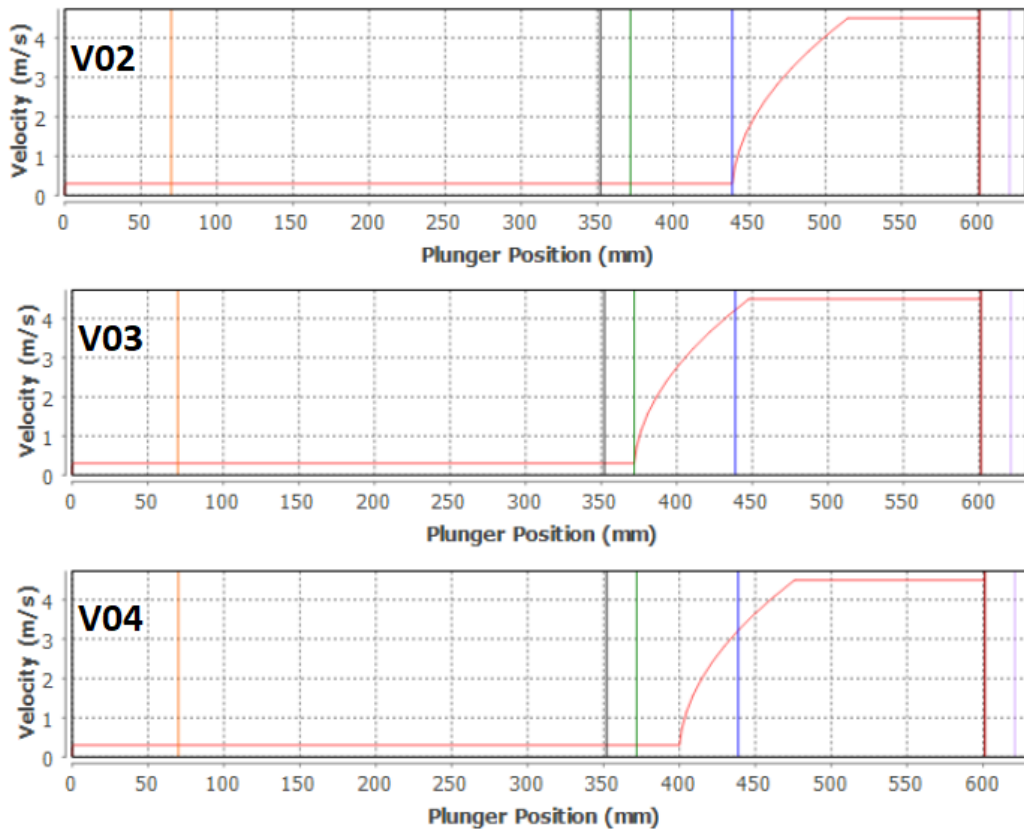


Figura 11. Velocidade do pistão por posição nas versões 01, 02 e 03. Gráficos extraídos do Magmasoft.

Nas Fig. 12 e Fig. 13 verificam-se as diferenças entre ambas as versões e o impacto que a *input* de início da segunda fase tem nos critérios de simetria de enchimento, probabilidade de junta fria e de porosidade por aprisionamento de ar.

Começando com a simetria de enchimento e probabilidade de junta fria, observa-se uma melhora das versões 03 e 04 em relação a versão 02, conforme verifica-se na Fig. 12:

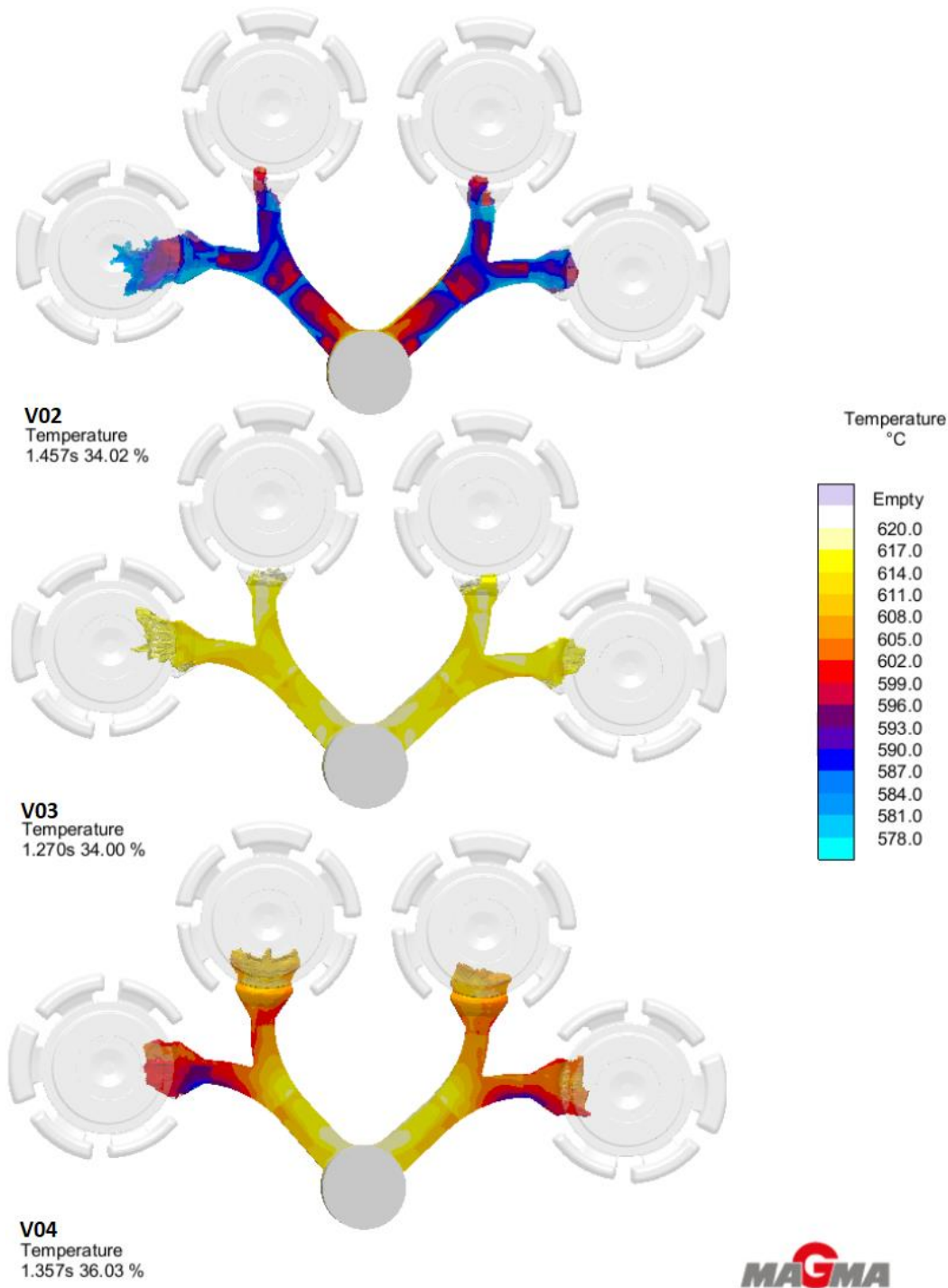


Figura 12. Temperatura de enchimento nas versões 01, 02 e 03.

É bastante evidente uma melhora progressiva do critério de simetria de enchimento da versão 02 a versão 04. Fica claro também o impacto que o início da segunda fase tem na temperatura do metal nas cavidades. Percebe-se conforme escala de cores que quando a segunda fase iniciou-se mais cedo (versão 03), o metal chegou nas cavidades com uma temperatura mais alta, comparado quando a segunda fase teve começo mais tardio na versão 02. Uma menor perda térmica no enchimento é considerado melhor, pois há menor probabilidade de junta fria ou inclusões superficiais.

Nos critérios de junta fria e simetria as versões 04 e 03 mostraram-se melhores, porém sabe-se que quanto mais rápido for iniciada a segunda fase, maior a probabilidade do aparecimento de porosidades devido ao aprisionamento de ar. Na Fig.13 observa-se a diferença destas versões de acordo com este critério de qualidade:

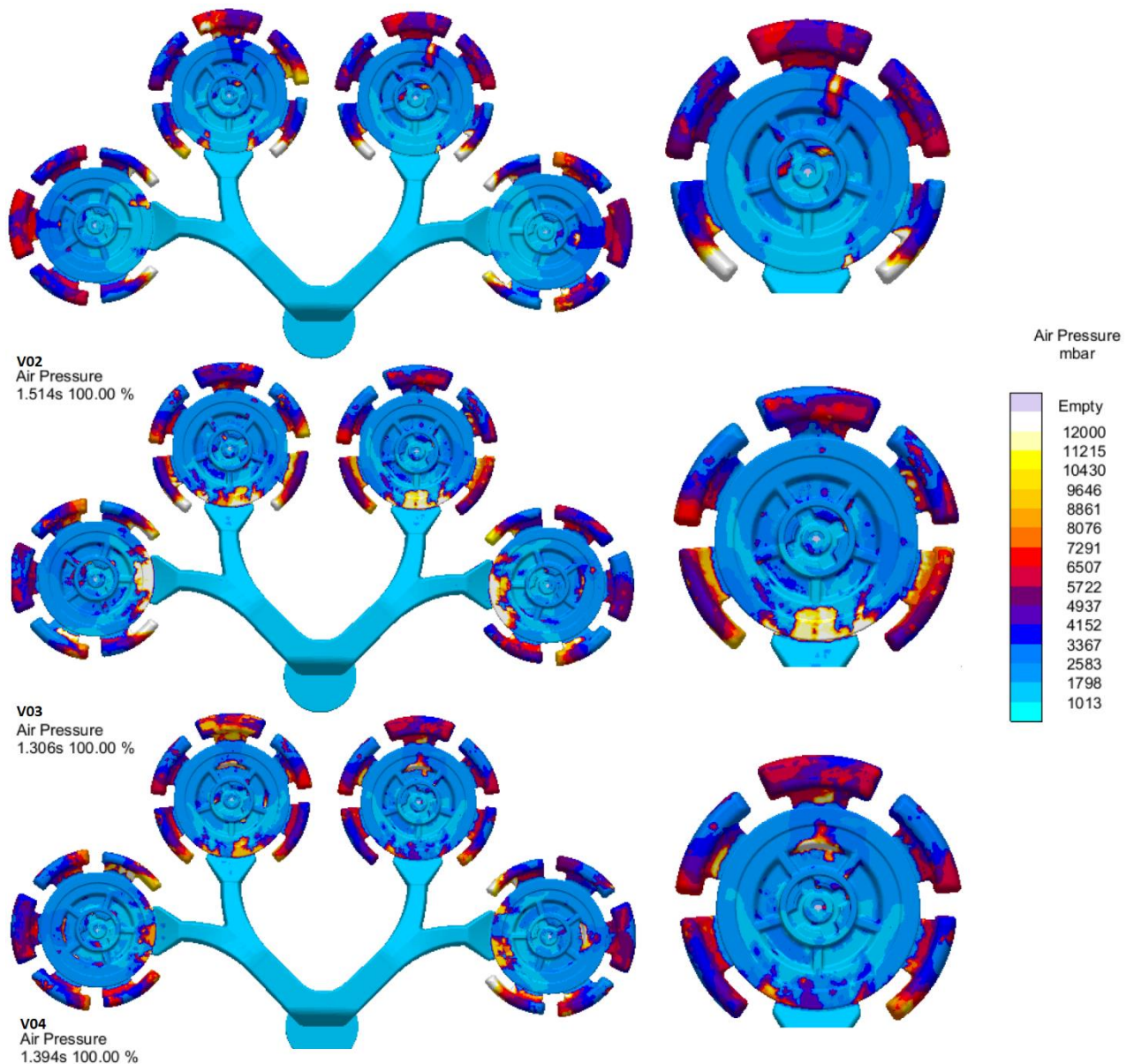


Figura 13. Pressão de ar nas versões 01, 02 e 03.

O resultado de “Air Pressure” do Magmasoft demonstra através da escala de cores as regiões das cavidades onde há a maior probabilidade de ocorrer porosidades por aprisionamento de ar. Por orientação do desenvolvedor do software, se houver regiões onde existe pressão acima de 1200 mbar (último valor na escala de cores) há uma forte probabilidade de porosidades. Percebe-se, ao contrário dos resultados anteriores, uma piora progressiva ao suceder-se as versões. A simulação da versão 02 possui uma menor probabilidade de apresentar porosidades, indo ao encontro do previsto baseado no início da segunda fase posterior as outras versões. A versão 03 apresenta resultados preocupantes nas regiões logo após o *gate*, e a versão 04 ampliou a probabilidade de defeitos nas regiões críticas já mostradas na versão 02.

Como o critério de qualidade relacionado a porosidade por aprisionamento de ar é mais importante do que a simetria de enchimento, e devido ao fato de que os problemas relacionados a junta fria apresentarem uma menor probabilidade de ocorrência, mesmo na versão 02 no qual estes obtiveram o pior resultado, optou-se por escolher a versão 02 como a melhor entre as quatro versões, já que esta foi superior no critério porosidade por aprisionamento de ar.

Realizando uma análise comparativa entre as versões quanto aos demais critérios de qualidade estabelecidos, verificou-se que todas as versões se equivaleram nos resultados obtidos. Entretanto, verificou-se que a versão 02 foi a melhor versão estudada, pois esta foi superior as demais versões no critério de probabilidade de aparecimento de porosidades por aprisionamento de ar, como demonstrado na Fig. 13. Devido a isso, os demais critérios de qualidade avaliados a seguir foram relacionados a versão 02, apesar das demais versões terem resultados bem similares.

Quanto ao primeiro critério de qualidade, rendimento metálico, o sistema de alimentação da versão 02 obteve rendimento de 33%, sendo maior que o estabelecido como meta de 30%.

Quanto ao terceiro critério de qualidade, baixa probabilidade de presença de porosidades por contração volumétrica na peça, o resultado *Porosity* do Magmasoft demonstrou, conforme Fig.14 que não há a menor probabilidade do aparecimento deste defeito.



Figura 14. Porosidade por contração volumétrica na versão 02.

A escala de cores da Fig. 14 apresenta a probabilidade de aparecimento de porosidade. Percebe-se que a cor azulada, indicando a tendência de porosidade, aparece apenas nos *runners* e *overflows*, o que é aceitável e esperado.

Quanto ao quarto critério de qualidade, baixa probabilidade de presença de turbulência excessiva no escoamento, foi analisado a versão 02 na Fig. 10 e suas respectivas interpretações. Considerou-se a versão 02 com uma turbulência aceitável para o processo de injeção.

Quanto ao quinto critério de qualidade, simetria de enchimento das cavidades, foi analisado e interpretado na Fig.12 e Fig.7. Considerou-se que a versão atendeu este critério de forma moderada, porém tratando-se de um critério que não impacta diretamente em defeitos, entendeu-se como regular o resultado obtido.

Quanto ao sexto critério de qualidade estabelecido, velocidade no *gate*, este foi atendido com sucesso, conforme Fig.15:

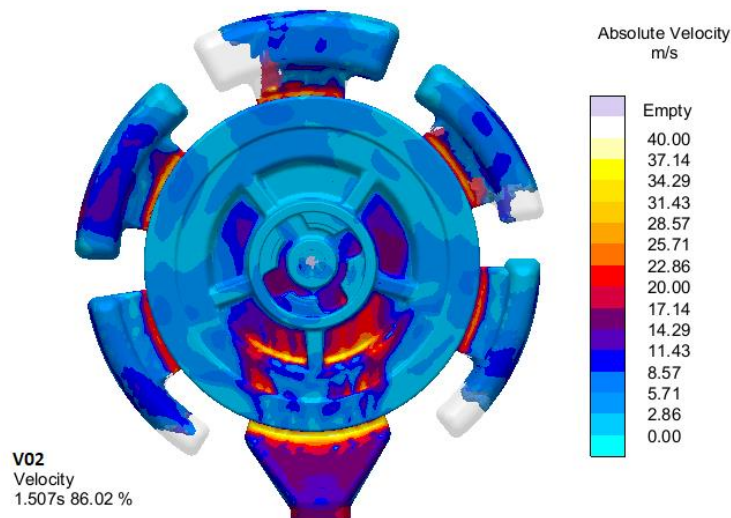


Figura 15. Porosidade por contração volumétrica na versão 02.

A Fig.15 mostra uma cavidade em processo de enchimento, da versão 02. A escala de cores representa a velocidade absoluta do metal (m/s) em $t = 1,507s$, no qual a maior velocidade nos *gates* durante o enchimento foi encontrada. Verifica-se que a velocidade no *gate* é a maior encontrada no sistema, porém de acordo com a escala de cores, esta se encontra perto de 40 m/s. O critério de qualidade estabelecido foi que esta atingisse o valor máximo de 60 m/s. Portanto a versão 02 encontra-se aprovada quanto ao critério de velocidade no *gate*.

Quanto ao sétimo critério de qualidade, tempo de solidificação do *gate*, a versão 02 também obteve resultado positivo. A Fig.16 mostra a relação de solidificação entre *gate* e peça:

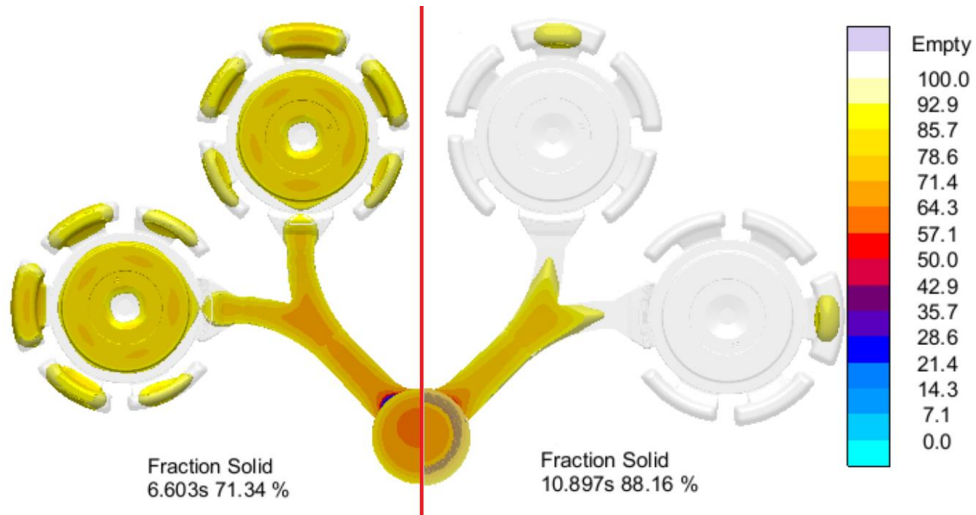


Figura 16. Fração de sólido na versão 02. Fonte: própria

Na Fig.16 observa-se à esquerda o momento em que o *gate* se solidifica, e na direita o momento em que a peça esta totalmente solidificada. Dividuiu-se esta imagem em dois tempos diferentes para melhor ilustrar o processo. A escala de cores representa a fração de solidificação do metal, sendo com o último valor da escala, o metal totalmente líquido e zero, o primeiro valor da escala como totalmente solidificado. No momento em que o metal atinge um valor próximo a zero, a região correspondente ao metal torna-se transparente, possibilitando uma melhor visualização do processo de solidificação. Conforme verifica-se os *gates* solidificaram no tempo 6,603s e as peças no tempo 10,897s. O critério estabelecia que o tempo do *gate* deveria ser maior que metade de tempo da peça. Como $6,603 > 10,897/2$, tem-se aprovado este critério de qualidade.

Quanto ao oitavo critério de qualidade, baixa probabilidade de presença de junta fria, analisou-se o tópico brevemente na interpretação da Fig.12. Analisando-se mais profundamente, verifica-se na “Fig.17” o encontro de duas frentes metálicas durante o enchimento, fato geralmente associado a junta fria:

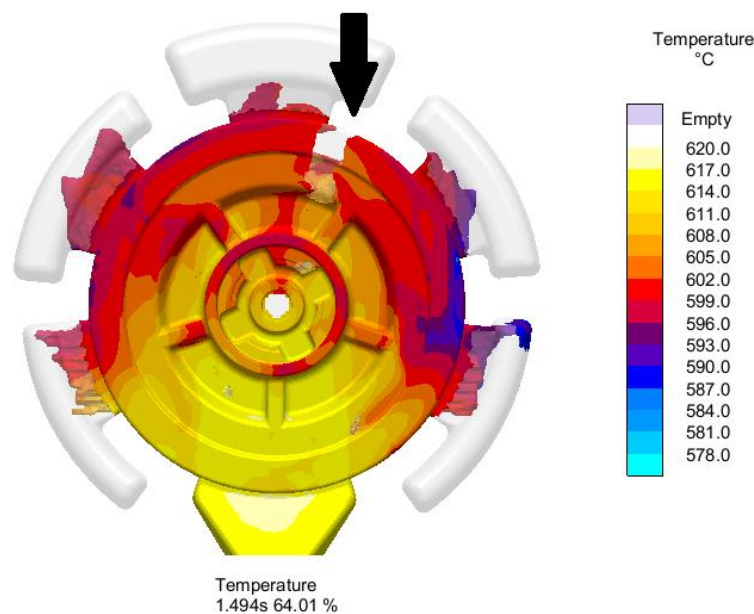


Figura 17. Temperatura no enchimento na versão 02.

Conforme Fig. 17, a última frente metálica a se unir na peça está indicada pela seta. Haveria maior probabilidade de junta fria se este encontro de duas frentes estivesse próximo ou abaixo da temperatura de solidificação do metal. Com efeito, não é isto que ocorre. A temperatura da frente metálica fica próxima dos 602°C, que corresponde a cerca de metade do valor dos limites de temperatura de solidificação e inicial. Com este resultado, torna-se aprovado o critério de qualidade correspondente.

Sendo assim, todos os critérios de qualidade elencados tornam-se atendidos com a versão 02, tornando o projeto otimizado do sistema de alimentação aprovado.

6. CONCLUSÃO

Verificou-se nos resultados da simulação a relação entre o início da segunda fase e a tendência ao aparecimento de porosidade por aprisionamento de ar. A relação entre altas velocidades, turbulência e porosidade havia sido apontada de acordo com as fontes, e os resultados da simulação comprovaram uma relação de aumento proporcional entre as duas variáveis.

Foram feitas quatro versões do mesmo projeto e a versão 02 foi escolhida por apresentar um melhor resultado referente a porosidade por aprisionamento de ar e turbulência.

Os objetivos iniciais deste trabalho foram cumpridos, pois foi possível realizar um projeto otimizado com os requisitos de qualidade estabelecidos, porém teria sido extremamente arriscado conduzir este tipo de projeto sem o auxílio do CAE.

Torna-se evidenciado através deste trabalho a importância dos sistemas de simulação baseado na análise de elementos finitos para a verificação e validação de projetos de engenharia. Com a intensa competitividade atual do mercado, o investimento em tecnologia torna-se primordial para agregar valor ao produto, além de reduzir custos de possíveis retrabalhos devido ao mau funcionamento do projeto. A complexidade inerente a um processo submetido a solicitações térmicas e mecânicas torna inviável uma análise sem um método de simulação numérica, pois a simulação promove um fator maior de confiabilidade para a análise e validação de processos complexos.

7. AGRADECIMENTOS

Agradece-se a empresa Gama Matriz de Caxias do Sul, que gentilmente cedeu o software Magmasoft para a realização deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- Andresen, Bill, 2005, “Die Casting Engineering, a Hydraulic, Thermal, and Mechanical Process”, Ed. Marcel Dekker, New York, EUA.
- Sully, 1992, “ASM Metals HandBook Volume 15 – Casting”
- Dargusch, Matthew S.; G. Dourb; N. Schauer; C.M. Dinnis; G. Savaged, 2006, “The influence of pressure during solidification of high pressure die cast aluminium telecommunications components”, Journal of Materials Processing Technology
- Fuoco, Ricardo 2006, “Curso de Fundição sob Pressão”, IPT
- Hyuk-Jae Kwon e Hong-Kyu Kwon, 2018, “Computer aided engineering (CAE) simulation for the design optimization of gate system on high pressure die casting (HPDC) process”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 000 1-7
- Oliveira, Reinaldo e Galhardi, Antonio, 2016, “Simulação Numérica e a Fundição de Metais no Brasil”, CEETEPS, São Paulo, Brasil.
- Ravi, B. e Srinivasan, M. N., 1996, “Casting solidification analysis by modulus vector method”, Int. J. Cast Metals Res., Vol.9, pp. 1-7
- Verran, Guilherme O. e Mendes, Rui Patrick, 2006, “Simulação numérica e DOE aplicados na melhoria do processo de fundição sob pressão de ligas de alumínio”, Estudos tecnológicos - Vol. 2, nº 1:13-25
- Verran, Guilherme O., 2000, “Fundição sob Pressão”, Departamento de Engenharia Mecânica UDESC: http://www.joinville.udesc.br/porta/professores/verran/materiais/Aula_05_Fundi__o_Sob_Press_o.pdf

ALUMINIUM DIE CASTING OPTIMIZATION USING NUMERIC SIMULATION SOFTWARE

Eduardo Felipe dos Santos, edu.felipedossantos@gmail.com

Advisor professor: Lisiane trevisan, lisiane.trevisan@farroupilha.ifrs.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95180-000, Farroupilha – RS

***Abstract.** The high pressure die casting injection process (HPDC) has the capacity to produce metallic parts with very low tolerance dimensions and with a high quality casting part. The present work demonstrates a methodology of design optimization of a SAE 306 aluminum pulley die casting. The adopted methodology is based in an interactive system between CAD and CAE, using the CAE software Magmasoft to predict the results associated with casting quality. There has been adopted quality standards for the approval of the project and the simulation results has been analyzed in relation to these standards. Process input parameters such as the beginning of the second injection phase were related to the simulation results, in which they demonstrated a direct relation between high filling velocities and turbulence with the increase in the probability of appearance of porosities.*

Keywords: HPDC, Magmasoft, injection, simulation