

# **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA FUNDIÇÃO EM MOLDE DE AREIA E COQUILHA DE LIGA DO SISTEMA A L-ZN-MG-CU: UM ESTUDO DE CASO ENVOLVENDO A MANGA DE EIXO DE UM PROTÓTIPO FORMULA SAE**

**Gabriela Silva Bonugli**, gabriela.bonugli@acad.ufsm.br<sup>1</sup>

**Augusto Alpe Coppetti**, agosto.alpe@acad.ufsm.br<sup>1</sup>

**Cristiano Scheuer**, cristiano.scheuer@ufsm.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

**Bismarck Luiz Silva**, bismarck.silva@ufrn.br<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 59078-970, Natal, RN, Brasil

**Resumo.** A manga de eixo de um Formula SAE constitui o elo de ligação entre o conjunto roda-pneu e os braços da suspensão do veículo, influenciando diretamente a sua dirigibilidade, estabilidade e desempenho. Nos veículos esportivos e de competição, esse componente é geralmente produzido em alumínio, com o intento de reduzir a massa global do veículo. Neste sentido, neste trabalho avaliou-se comparativamente a utilização dos processos de fundição em molde de areia e coquilha, para produção do referido componente a partir de uma liga de alumínio do sistema Al-Zn-Mg-Cu. A análise comparativa foi feita por simulação numérica empregando o software Inspire Cast, avaliando-se a influência das características intrínsecas de cada processo sobre o fluxo do metal, solidificação e nível de porosidade da peça. A utilização da simulação numérica permitiu identificar os pontos quentes na peça, de modo a determinar com precisão a posição dos massalotes e bolsões de gases. O processo de fundição em areia é o mais adequado para a produção do componente em questão.

**Palavras chave:** Fundição. Simulação Numérica. Componente Automotivo. Manga de Eixo. Liga de Alumínio.

**Abstract.** The shaft-sleeve of a Formula SAE is the link among the wheel-tire assembly and the vehicle's suspension arms, directly influencing its handling, stability and performance. In sports and competition vehicles, this component is usually produced in aluminum, with the aim of reducing the overall mass of the vehicle. In this sense, in this work, the use of sand and mold casting processes for the production of the related component from an aluminum alloy of Al-Zn-Mg-Cu alloy system was comparatively evaluated. The comparative analysis was performed through numerical simulation employing by Inspire Cast software, evaluating the influence of each process characteristics on the metal flow, solidification, and porosity level of the component. The numerical simulation allowed to identify the casting part hot-spots, in order to accurately determine the risers position. The sand casting process is the most suitable for the production of the evaluated component.

**Keywords:** Casting. Numerical Simulation. Automotive Component. Shaft-sleeve. Aluminum Alloy.

## **1. INTRODUÇÃO**

Como um importante componente do sistema de rodagem dos veículos automotores, pode-se citar a manga de eixo, a qual é responsável por conectar, entre outros, o braço de esterçamento no sistema de direção, acoplamentos da suspensão, itens do sistema de freios e a ponta do eixo de transmissão. No caso específico dos veículos de competição, como os Formula SAE, por exemplo, a complexidade no projeto e fabricação das mangas de eixo é maior, pois é necessário conciliar vários requisitos de projeto, os quais são muitas vezes conflitantes entre si (Araújo, 2017).

Neste caso em específico, o referido componente é produzido em pequena escala, o que somado aos requisitos de projeto e uso, restringe os materiais e processos de fabricação que podem ser economicamente viáveis para a sua produção. As ligas de alumínio são materiais comumente aplicados na manufatura de tal peça, principalmente devido à sua elevada resistência específica e capacidade de absorção de energia. Em termos de processos de fabricação, a fundição é usualmente empregada para a produção de pequenos lotes (Santos, 2016).

A produção de peças em ligas de alumínio através do processo de fundição é realizada tanto utilizando moldes perecíveis (em areia) quanto permanentes (coquilhas metálicas). As características construtivas de tais ferramentas (formas e dimensões dos canais e massalotes), exercem efeito direto sobre o escoamento e contração do metal líquido e, conseqüentemente, sobre a sanidade da peça. Dessa forma, o correto dimensionamento destes elementos faz-se necessário para a produção de peças isentas de defeitos (Baldan, 2014)

A modelagem computacional constitui uma importante ferramenta para auxiliar no planejamento e parametrização dos processos de fundição. O objetivo da modelagem computacional de qualquer processo industrial é permitir que sejam feitas previsões no tocante ao efeito dos parâmetros de entrada adotados, sobre o resultado final obtido após a execução do processo. O modelamento preciso do escoamento do fundido e preenchimento da cavidade do molde, bem como a subsequente solidificação do metal, mitiga a ocorrência de defeitos de ordem metalúrgica, e àqueles relacionados à moldabilidade. Partindo-se da previsão de ocorrência de tais defeitos, o traçado e projeto da peça, canais e massalotes podem ser otimizados, bem como a composição e os constituintes da carga de fusão no forno podem ser aprimorados. Dessa forma, elimina-se a necessidade de realização de retrabalhos e de execução de ensaios onerosos de controle de qualidade (Brown, 2000).

Com base no exposto, neste trabalho a simulação numérica foi empregada como ferramenta para otimizar o projeto de moldes para produção da manga de eixo de um veículo Formula SAE. Mais especificamente, realizou-se uma análise comparativa para avaliar a viabilidade técnica de produção da referida peça pelos processos de fundição em molde de areia e coquilha, utilizando uma liga de alumínio do sistema Al-Zn-Mg-Cu.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 1 é mostrada uma representação esquemática da manga de eixo do veículo Formula SAE, a qual foi modelada geometricamente no software SolidWorks. É possível ver o sistema de canais adotado, o qual foi previamente determinado seguindo o procedimento sugerido por Baldan (2014).

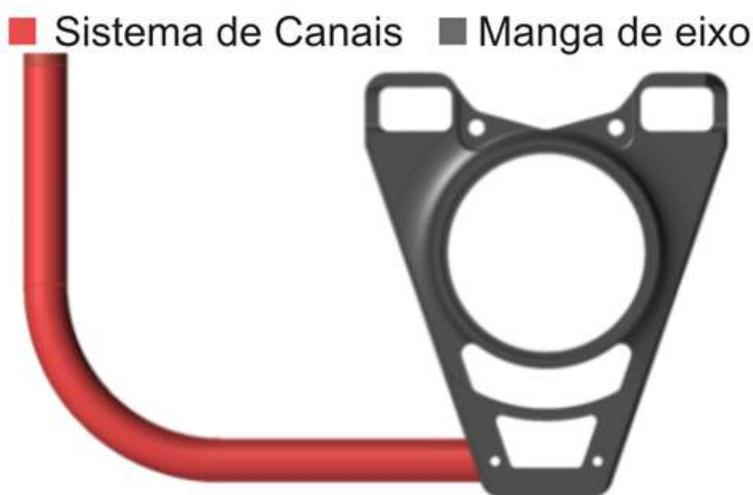


Figura 1. Modelagem geométrica da manga de eixo indicando o sistema de canais

Após modelagem, o arquivo foi importado para o software Inspire Cast, o qual foi empregado na simulação numérica do preenchimento do molde e solidificação do fundido. No software, foram avaliados os recursos:

- “último ar”, que permite identificar os pontos com tendência a aprisionamento de ar e, conseqüente, formação de poros;
- “frente de avanço”, que permite entender o fluxo e seqüência de enchimento da cavidade do molde pelo metal fundido; e
- “fração de sólido”, que permite identificar os pontos quentes na peça fundida, os quais são susceptíveis à ocorrência de rechupes.

As mangas de eixo são comumente fabricadas em alumínio, sendo as ligas do sistema Al-Zn-Mg-Cu usualmente empregadas para esta aplicação. Partindo-se da definição da matéria-prima, as propriedades físicas do material adotado foram estabelecidas a partir das informações contidas no banco de dados do software Inspire Cast, assim como as propriedades físicas do molde em areia e coquilha (aço ferramenta para trabalho à quente).

Como parâmetro de preenchimento do molde de areia foi escolhido a opção de nível constante de líquido no canal de vazamento; e para coquilha, uma velocidade de injeção de 0,5 m/s e velocidade de intensificação de 2,5 m/s. A malha utilizada em todas as simulações foi mantida constante, com uma espessura média de 5,72 mm. Foram adotados

massalotes com módulo e volume de 0,3 e  $1,89 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  para o molde de areia, e 0,6 e  $1,89 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ , respectivamente, para a coquilha. As dimensões dos massalotes foram determinadas seguindo o procedimento proposto por Baldan (2014).

Por fim, para as simulações numéricas em molde de areia, fez-se uso de massalotes com luvas exotérmicas, as quais possuem a função de manter os massalotes quentes por um maior intervalo de tempo durante a solidificação, evitando a formação de rechupes. As propriedades físicas do material da luva exotérmica foram determinadas a partir das informações contidas no banco de dados do software.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Fundição em molde de areia

Os resultados da primeira simulação numérica realizada empregando o molde em areia para produção da manga de eixo do veículo Formula SAE são mostrados na Figura 2. Essa primeira avaliação foi realizada com o intuito de identificar os locais de ocorrência de defeitos por falta de preenchimento, e determinar as posições dos massalotes e bolsões. Neste primeiro momento, foi analisado o comportamento do sistema durante o enchimento (Figura 2a) e solidificação, a fim de identificar as posições no volume da peça susceptíveis à formação de porosidade (Figura 2b) e rechupes (Figura 2d). Estes últimos em virtude da ocorrência dos pontos quentes na peça (Figura 2c).

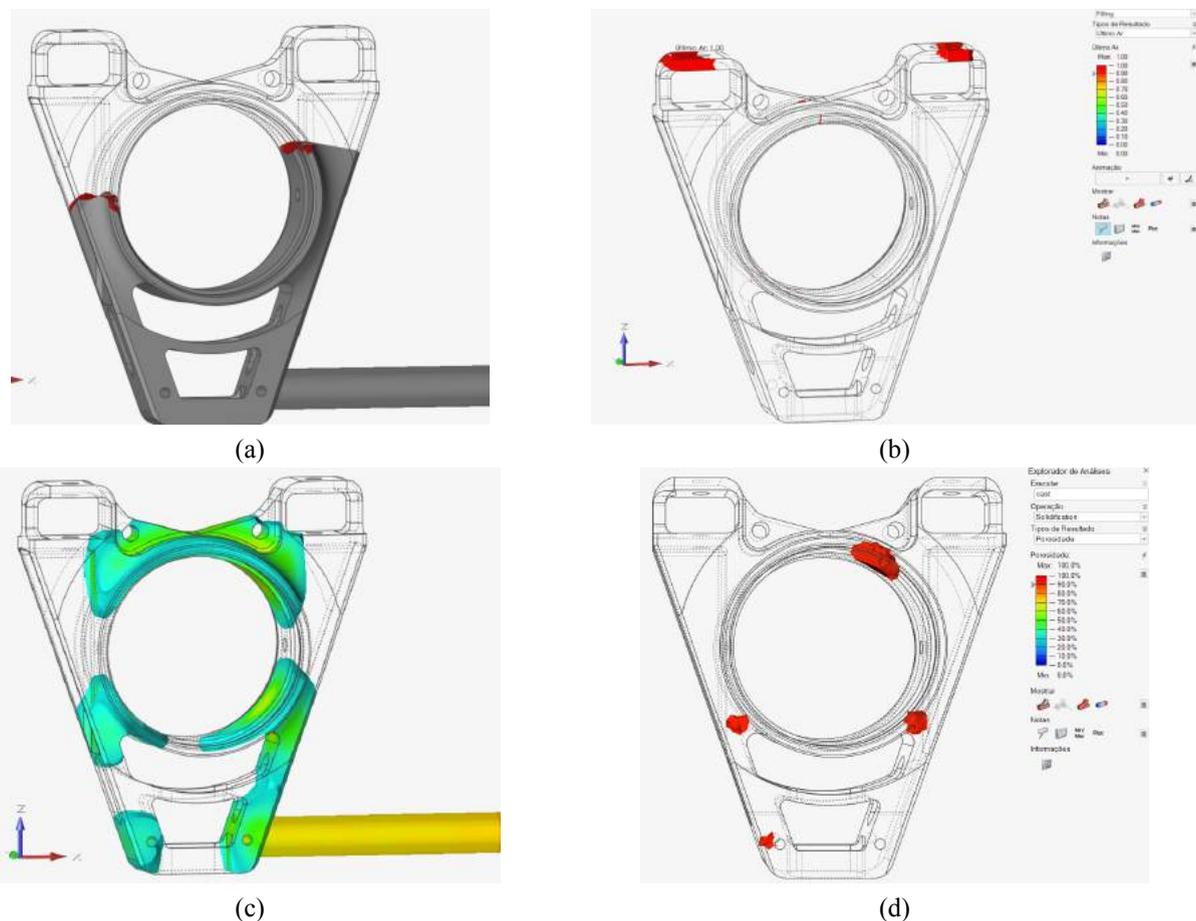


Figura 2. Resultados da primeira simulação da fundição em areia indicando (a) o enchimento da cavidade do molde, (b) os pontos de retenção de ar no volume da peça, (c) a ocorrência dos pontos quentes na peça e (d) os pontos de formação dos rechupes.

Na Figura 2a pode-se observar que a frente de avanço se dá de forma contínua, sem ocorrência de fluxo turbulento o que favorece a retenção dos bolsões de ar junto às bolsas na parte superior da peça. Vale ressaltar que o posicionamento do canal de ataque na parte inferior da peça promove esse comportamento, sendo sempre indicado a sua adoção nos processos de fundição por gravidade. Outro fator que contribui para a regularidade no preenchimento da cavidade, é a geometria da peça, que tem um aumento gradual em seu volume, sem qualquer redução repentina na sua seção.

A Figura 2b mostra os bolsões onde ficam retidos os gases (contidos no interior da cavidade do molde e diluídos no próprio metal fundido). Mesmo na moldagem em areia, onde os gases podem ser dissipados para o meio externo pela permeabilidade do molde, existe uma tendência à retenção de gases no interior da sua cavidade, com consequente formação de porosidade. Dessa forma, é recomendado o emprego de bolsões, ou suspiros, para efetuar o aprisionamento e/ou exaustão destes gases.

Na Figura 2c é possível identificar a fração de sólido durante o preenchimento da cavidade, verificando-se os locais onde o volume remanescente de líquido solidifica-se (pontos quentes), e pontos onde ocorre a formação de rechupes conforme indicado na Figura 2d. Para evitar a formação de rechupes, é recomendado a introdução de massalotes junto aos pontos quentes na peça fundida.

Partindo-se dos resultados da primeira simulação, determinou-se na peça o posicionamento dos bolsões de retenção de gases e massalotes (Figura 3a), e a simulação numérica foi então repetida. Na segunda simulação, conforme pode ser visualizado na Figura 3b, praticamente todo gás aprisionado no interior do molde se concentrou nos bolsões. O resultado da fração sólida (Figura 3c) indica que os pontos quentes foram deslocados para os massalotes, para o caso daqueles posicionados na face oposta àquela do sistema de canais. Nesta parte do volume da peça as dimensões dos rechupes diminuíram substancialmente. Entretanto, as dimensões dos rechupes permaneceram demasiadas na outra parte do volume da peça, necessitando um reprojeito da posição dos massalotes.

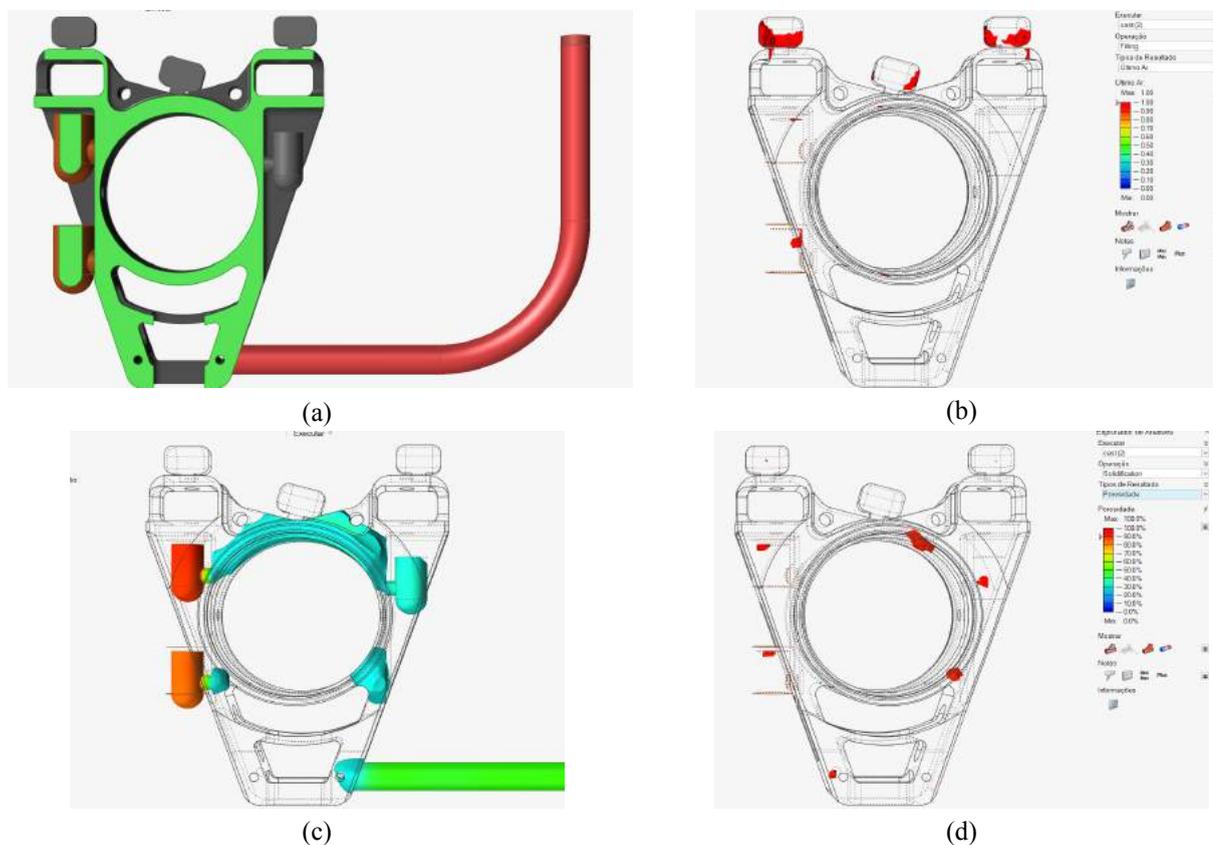


Figura 3. Resultados da segunda simulação da fundição em areia indicando (a) os locais de posicionamento dos bolsões de ar e massalotes, (b) os pontos de retenção de ar no volume da peça, (c) a ocorrência dos pontos quentes na peça e (d) os pontos de formação dos rechupes.

Aplicando a regra dos módulos (Baldan, 2014), a posição dos massalotes foi definida segundo os locais mostrados na Figura 4a. Com essa modificação foi possível deslocar todos os pontos quentes da peça para os massalotes, praticamente eliminando a ocorrência de rechupes (Figura 4b). A Figura 4c mostra que tais modificações não influenciaram sobre a formação de porosidades, mantendo-se o aprisionamento dos gases junto aos bolsões.

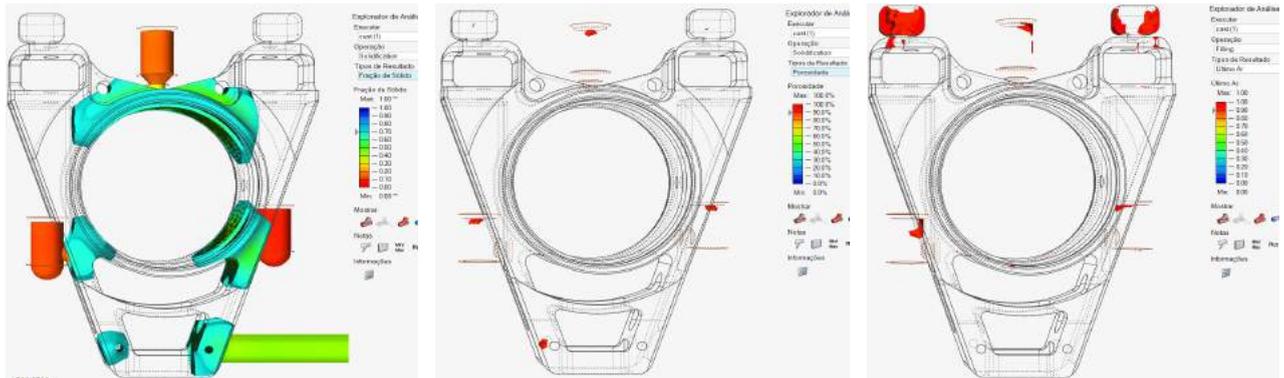
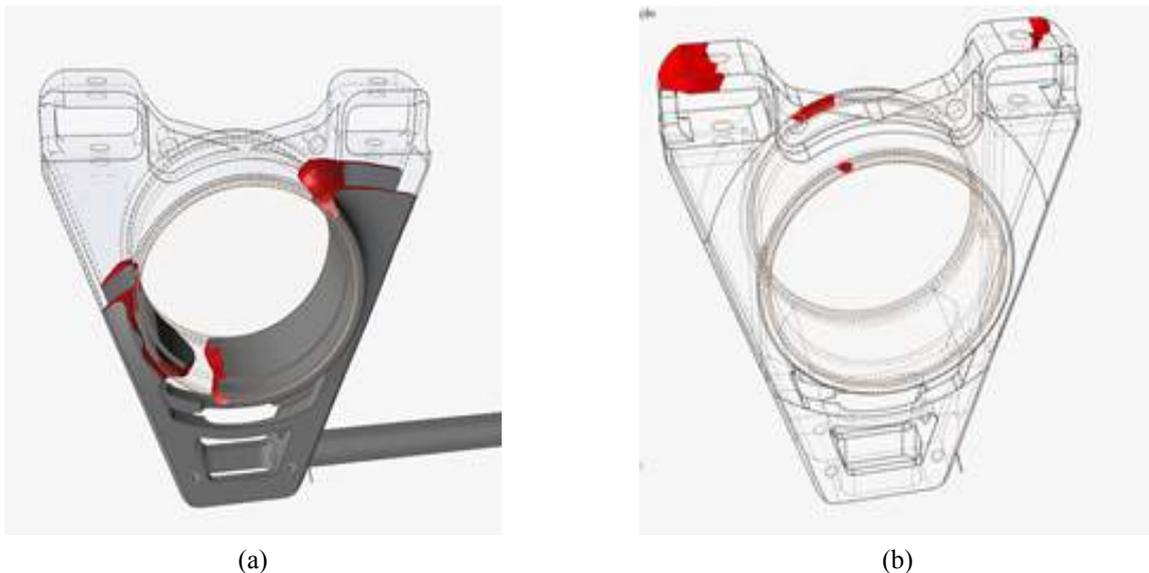


Figura 4. Resultados da terceira simulação da fundição em areia indicando (a) os locais de posicionamento dos massalotes e bolsões de gases e ocorrência dos pontos quentes na peça, (b) os pontos de formação dos rechupes e (c) os pontos de retenção de ar no volume da peça.

### 3.2. Fundição em coquilha

Embora o traçado e o projeto de peças fundidas em coquilha sejam distintos daqueles praticados em peças fundidas em areia, com o intento de efetuar uma comparação entre os processos, aqui adotou-se a mesma geometria e dimensões da peça avaliada anteriormente. Novamente, realizou-se a primeira simulação desconsiderando a utilização de massalotes e bolsões.

Neste sentido, a Figura 5 mostra a evolução do processo de produção por fundição em coquilha da manga de eixo do veículo Formula SAE. Na Figura 5a observa-se que o enchimento da cavidade ocorre de forma progressiva, porém devido à maior velocidade de escoamento do fundido, o fluxo de metal torna-se turbulento promovendo a retenção de bolsões de gases, principalmente ao entorno do núcleo principal e face superior da peça durante o enchimento. A Figura 5b evidencia a localização dos bolsões de gases após a completa injeção do metal no molde, indicando a tendência de formação de porosidade na face superior da peça conforme esperado. A Figura 5c, por sua vez, mostra os pontos quentes na peça injetada, os quais tornam-se susceptíveis à formação de rechupes, conforme comprovado na Figura 5d.



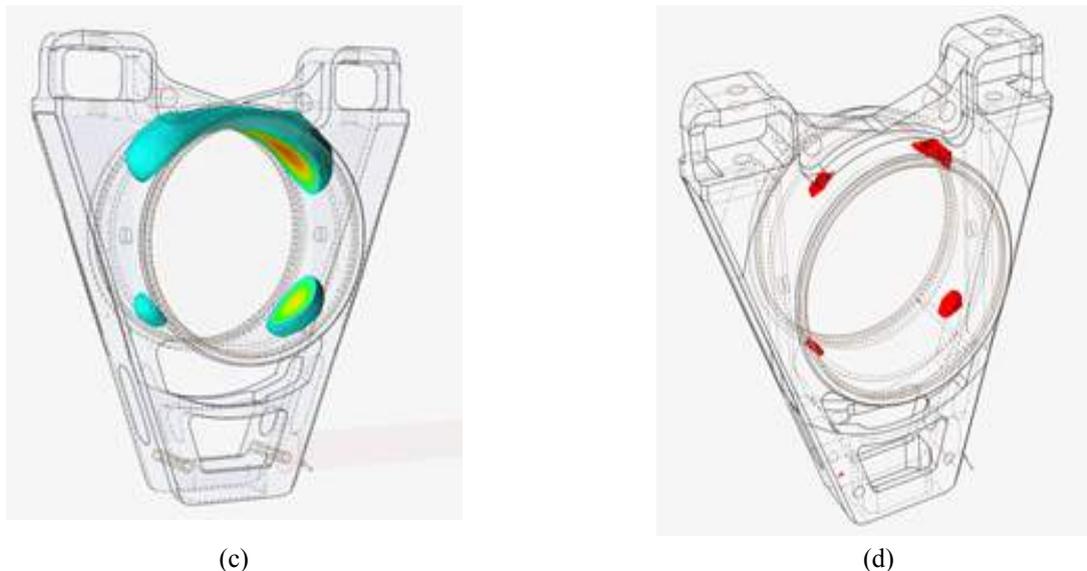
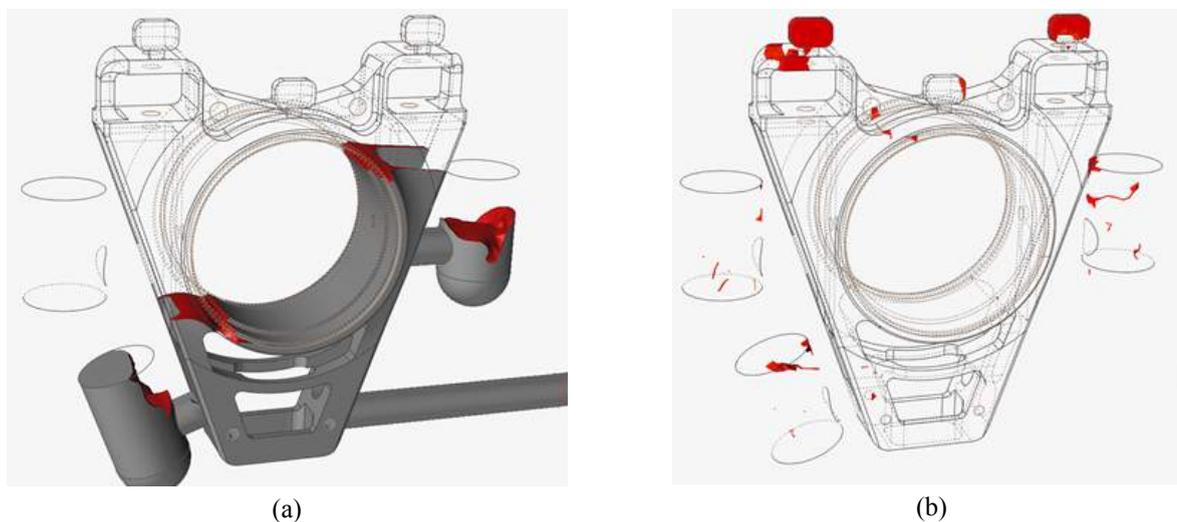


Figura 5. Resultados da primeira simulação da fundição em coquilha indicando (a) o enchimento da cavidade do molde, (b) os pontos de retenção de ar no volume da peça, (c) a ocorrência dos pontos quentes na peça e (d) os pontos de formação dos rechupes.

De modo a contornar a formação de poros e rechupes, foram introduzidos bolsões e massalotes junto ao volume da peça e as simulações numéricas foram repetidas, conforme apresenta a Figura 6. Pode-se observar a partir da análise da Figura 6a, que a introdução dos massalotes e bolsões permite uma melhora no enchimento da peça, produzindo um fluxo menos turbulento. Disto, resulta que os poros resultantes da retenção de gases concentram-se quase que exclusivamente nos massalotes e bolsões de gases conforme demonstrado na Figura 6b. A Figura 6c mostra a manutenção da ocorrência dos pontos quentes junto à região central da peça, porém neste caso em menor concentração, quando comparada ao identificado na Figura 5c. Por fim, devido à formação dos pontos quentes, a peça apresenta rechupes nesses pontos conforme evidenciado pela Figura 6d. Confrontando-se a Figura 6d com a Figura 5d, pode-se concluir que neste caso a introdução de bolsões e massalotes não promoveu a redução do tamanho dos rechupes.



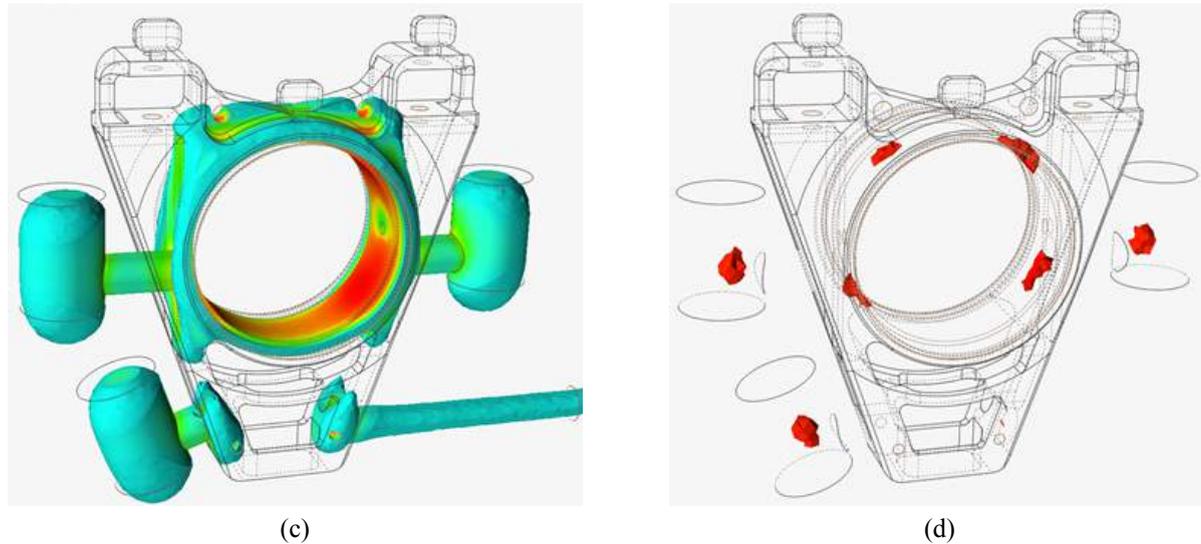


Figura 6. Resultados da segunda simulação da fundição em coquilha indicando (a) os locais de posicionamento dos bolsões de ar e massalotes e o enchimento da cavidade do molde, (b) os pontos de retenção de ar no volume da peça, (c) a ocorrência dos pontos quentes na peça e (d) os pontos de formação dos rechupes.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, o software Inspire Cast foi usado para simular o processo de fundição em molde de areia e coquilha de uma manga de eixo de veículo Formula SAE em liga de alumínio. A partir dos resultados obtidos e discutidos é possível concluir que:

- A simulação numérica constituiu-se uma importante ferramenta para otimização do projeto e fabricação de peças fundidas;
- O emprego de massalotes e bolsões de gases no projeto das peças permitiu mitigar a ocorrência, nesta ordem, de defeitos do tipo rechupes e poros;
- Especificamente para a matéria-prima e condições de contorno adotadas, a fundição em molde de areia permitiu produzir o componente analisado com uma maior sanidade.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Altair Engineering Inc. pelo fornecimento da licença do software Inspire Cast para realização deste trabalho.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Araujo, E., 2017. “Desenvolvimento de mangas de eixo de veículo Formula sae em liga AlSi7Mg0,3 por fundição”. Monografia (Projeto Final de Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville/SC.
- Baldan, R.L., 2014. “Fundição: processos e tecnologias correlatas”. 2ª ed. São Paulo: Editora Érica.
- Brown, J.R., 2000. “Chapter 20 - Computer simulation of casting processes”. Foseco Ferrous Foundryman's Handbook (Eleventh Edition), Butterworth-Heinemann. Pages 344-IV. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-075064284-2/50021-1>.
- Santos, R.K.P., 2016. “Desenvolvimento de produto para sistema de suspensão de veículo de competição”. Monografia (Projeto Final de Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville/SC.

#### 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.