

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

GABRIEL ARRAIOL CASAES

ANÁLISE DA SIMULAÇÃO CAE DE UMA PEÇA FABRICADA PELO PROCESSO
DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO SOB PRESSÃO

Joinville

2022

GABRIEL ARRAIOL CASAES

ANÁLISE DA SIMULAÇÃO CAE DE UMA PEÇA FABRICADA PELO PROCESSO
DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO SOB PRESSÃO

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de Bacharel no Curso
de Graduação em Engenharia Automotiva
do Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Dr. Carlos Mauricio
Sacchelli.

Joinville

2022

GABRIEL ARRAIOL CASAES

ANÁLISE DA SIMULAÇÃO CAE DE UMA PEÇA FABRICADA PELO PROCESSO
DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO SOB PRESSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 16 de Dezembro de 2022.

Banca Examinadora:

Dr. Carlos Maurício Sacchelli
Orientador

Dr. Modesto Hurtado Ferrer
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Wagner Maurício Pachekoski
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha família, namorada e amigos que sempre estiveram ao meu lado durante esta trajetória, oferecendo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Luciana e Gerson, por todo apoio, suporte e confiança oferecidos durante toda minha graduação.

À Deus por colocar as pessoas certas no meu caminho e me dar força e foco durante toda a trajetória.

À toda minha família pela confiança e apoio, em especial aos meus irmãos Thiago e Miguel e minhas avós Maria e Josefa.

Aos meus amigos, em especial ao Bruno e Vinícius, por todo apoio e companheirismo durante toda a graduação.

À minha namorada Camila por todo apoio, suporte, compreensão e união durante essa fase.

Ao meu orientador Dr. Carlos Maurício Sacchelli, pelo incentivo e orientações prestados durante toda a fase de iniciação científica e TCC.

À toda equipe de trabalho da Injeção de Alumínio da WEG, em especial ao Viktor e Luciano, pela colaboração e incentivo a esse trabalho.

Aos professores, servidores e colaboradores da Universidade Federal de Santa Catarina Campus Joinville.

Agradeço também à ESI Group pela disponibilidade do software QuikCAST® na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e à FUNDEP por meio do programa ROTA 2030 pelo apoio ao projeto “Melhoria no projeto de ferramentas de injeção de alumínio”.

RESUMO

Um dos processos mais utilizados para a obtenção de peças em alumínio é o processo de injeção sob pressão, com a utilização de moldes permanentes. Estes que são de custo elevado e há necessidade de uma assertividade grande no seu projeto, para que os retrabalhos sejam minimizados. Uma das ferramentas que pode ser utilizada para minimizar estes erros são os softwares *CAE (Computer Aided Engineering)*. Assim, o objetivo deste trabalho é otimizar a realização do projeto de um molde de injeção de alumínio sob pressão, através da simulação *CAE* por meio do software QuikCAST®, a fim de reduzir os custos com projeto e maximizar a vida útil da ferramenta. Com a simulação foi possível obter resultados de temperatura, porosidade, pressão máxima de gás, tempo de enchimento e solidificação, com isso foi possível validar a geometria da peça e chegar ao ponto ideal para entrada do alumínio, saída de gases e indicar um ponto para colocação da refrigeração.

Palavras-chave: Indústria Automotiva. Simulação. Fundição Sob Pressão.

ABSTRACT

One of the most used processes to obtain aluminum parts is the high pressure die casting (HPDC) with the use of injection molds. These molds are expensive and there is a need for great assertiveness in your project so that reworks are minimized. One of the tools that can be used to minimize these errors is CAE (Computer Aided Engineering) software. Thus, the objective of this work is to optimize the design of an HPDC mold, through CAE simulation using the QuikCAST® software, in order to reduce project costs and maximize tool life. With the simulation it was possible to obtain results of temperature, porosity, maximum gas pressure, filling and solidification time, with this it was possible to validate the geometry of the part and reach the ideal point for the entry of aluminum, exit of gases and indicate a point for placement of refrigeration.

Keywords: Automotive industry. Simulation. High Pressure Die Casting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Informações sobre uso do alumínio em âmbito mundial	14
Figura 2 – Informações sobre uso do alumínio em âmbito nacional	14
Figura 3 – Informações sobre a quantidade de alumínio para cada veículo de passeio	15
Figura 4 – Máquina HPDC	17
Figura 5 – Porta Molde HPDC	18
Figura 6 – Exemplo de cavidade de HPDC	19
Figura 7 – Mecanismos de falha	24
Figura 8 – Modelo 3D da tampa do servo motor	28
Figura 9 – Exemplo de servo motor	29
Figura 10 – Malha superficial	32
Figura 11 – Qualidade da malha superficial	32
Figura 12 – Pontos de entrada	33
Figura 13 – Dados da Liga	34
Figura 14 – Dados de temperatura	34
Figura 15 – Dados do molde implícito	35
Figura 16 – Dados de entrada de material	36
Figura 17 – Malha volumétrica	37
Figura 18 – Dados de saída de ar	37
Figura 19 – Análise da temperatura 1	38
Figura 20 – Análise da temperatura 2	39
Figura 21 – Análise de porosidade 1	39
Figura 22 – Análise de porosidade 2	40
Figura 23 – Análise da máxima pressão de gás 1	40
Figura 24 – Análise da máxima pressão de gás 2	41
Figura 25 – Análise da temperatura simulação final	42
Figura 26 – Análise da porosidade simulação final	42
Figura 27 – Análise da máxima pressão de gás simulação final	43
Figura 28 – Análise do tempo de enchimento simulação final	44

Figura 29 – Análise do tempo de solidificação simulação final	44
Figura 30 – Análise da concentração da temperatura simulação final	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio

CAE – *Computer Aided Engineering*

HPDC – *High Pressure Die Casting*

RSL – Revisão Sistemática de Literatura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVO GERAL	12
1.1.1. Objetivos Específicos	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1. PROCESSO DE INJEÇÃO SOB PRESSÃO	16
2.2. MOLDE DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO SOB PRESSÃO	17
2.3. FALHAS NO MOLDE	21
2.4. SOFTWARES CAE UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO	25
3. METODOLOGIA	28
3.1. PEÇA A SER SIMULADA	28
3.1.1. Validação da peça	29
3.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS	29
3.3. SIMULAÇÃO CAE	30
3.3.1. Método utilizado nas simulações	30
3.3.2. Método utilizado para análise das simulações	30
4. DADOS DE PROCESSO E SIMULAÇÃO	31
5. ANÁLISE DA SIMULAÇÃO	38
6. CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

A Fundição sob Pressão *HPDC (High Pressure Die Casting)* consiste em injetar o alumínio fundido, sob alta pressão e velocidade, através do canal de injeção de um molde com o formato da peça desejada, após ocorrer a solidificação, o molde se abre e é retirado o produto final (GASPAR, 2021).

O processo de *HPDC* é complexo e depende de alguns parâmetros para obter uma melhor qualidade nas peças e um menor desgaste nas ferramentas, nesse âmbito, para evitar falhas e retrabalhos é recomendada a utilização de softwares *CAE (Computer Aided Engineering)*.

Com a utilização de Softwares *CAE*, é possível verificar falhas antes mesmo da fabricação, tanto do ferramental, como da peça injetada, sendo também possível variar os parâmetros de processo para se obter uma melhor combinação (VERRAN, 2006).

Utilizar ferramentas de análise *CAE* nos dias atuais, é essencial para se obter uma boa peça na injeção de alumínio, com ela é possível otimizar os processos e o projeto de novos ferramentais (VERRAN, 2006).

Através da simulação pode-se analisar o processo de fabricação da peça injetada, num curto espaço de tempo a um custo adequado, modificando parâmetros de processo ou mesmo detalhes da geometria tanto do molde como da peça a ser fabricada.

Um bom projeto de um molde contempla, primeiramente, o estudo da cavidade, juntamente com os canais de alimentação, sobre material, saídas de ar e refrigeração. Outro passo importante é a escolha de material, tratamento térmico e superficial adequados e, também, o uso correto da ferramenta.

Nesse âmbito uma simulação *CAE* é de grande importância para obter êxito no projeto e evitar retrabalhos, a partir da mesma é possível aumentar a vida útil do molde, evitando trincas térmicas, erosão, desgaste, aderência entre outros problemas que ocorrem. Através de testes de parâmetros e posicionamento dos canais, é possível visualizar o comportamento do molde ainda na fase de projeto.

A grande diferença de um molde projetado através da simulação é a possibilidade de validar uma geometria antes mesmo da fabricação, podendo assim, se necessário, realizar alterações sem grandes custos, as quais, em uma ferramenta já pronta, poderiam ser inviáveis.

1.1. OBJETIVO GERAL

Otimizar a realização do projeto de um molde de injeção de alumínio sob pressão, através da simulação *CAE*, a fim de reduzir os custos com projeto e maximizar a vida útil da ferramenta.

1.1.1. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Validar a geometria da peça enviada pela equipe de projeto.
- Verificar o melhor ponto de entrada, através da simulação de enchimento, pela análise térmica e de fluxo.
- Verificar os pontos necessários de saída de ar na cavidade.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Um dos grandes desafios para a indústria automotiva é a redução das emissões de gases aliado a uma maior eficiência energética dos combustíveis. Nos carros produzidos antigamente não tinha-se a preocupação com a massa dos veículos.

A partir de estudos, relacionou-se a massa do veículo, com a emissão de poluentes e maior consumo de combustíveis, com isso iniciou-se uma corrida para a solução destes problemas.

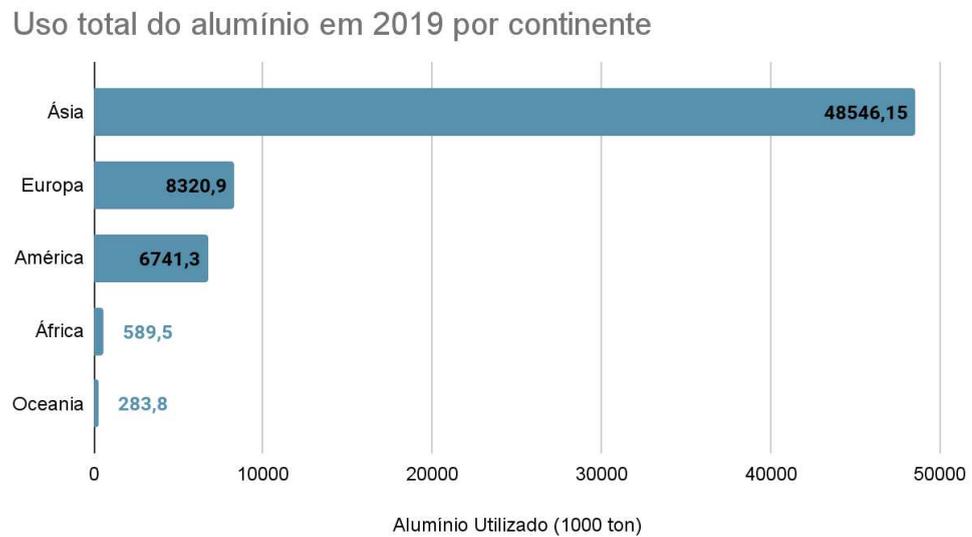
Um entrave para esta situação seria reduzir a massa dos carros sem afetar a segurança dos usuários e a estabilidade do veículo, uma das soluções é o emprego e pesquisas por novos materiais a serem utilizados, entre eles o alumínio (ABAL, 2021).

Entre os materiais disponíveis, o alumínio se destaca por possuir baixa densidade, elevada resistência à corrosão e boa resistência mecânica, podendo ser reciclado (REBELLO, 2000).

Nos dias atuais as empresas do ramo automobilístico já investem no processo de injeção de alumínio, tanto sob pressão como em baixa pressão, para vários componentes do veículo, tais como: motor, caixa de câmbio e caixa de direção. Nota-se, também, a tendência mundial para o uso do alumínio na fabricação de componentes estruturais do veículo.

A Figura 1 apresenta informações sobre o uso total do alumínio em 2019 por continente, os dados são em 1000 toneladas. Pode-se observar que no continente asiático o uso do alumínio é muito superior aos outros continentes, isso se deve ao fato do consumo elevado de alumínio na China, maior produtora mundial de alumínio.

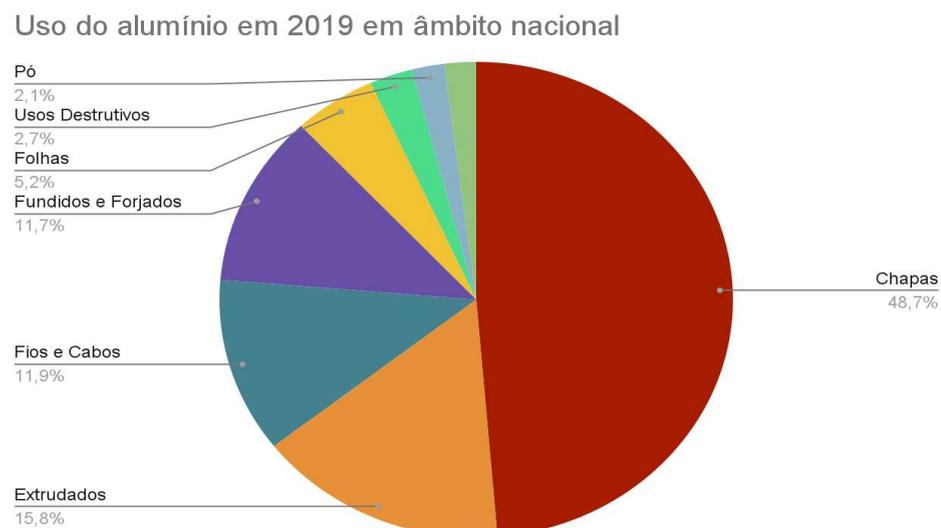
Figura 1 - Informações sobre uso do alumínio em âmbito mundial



Fonte: Garside (2021)

Na Figura 2 observa-se informações sobre o uso do alumínio em 2019 em âmbito nacional, observa-se que o maior uso se dá para confecção de chapas, seguido de extrudados, fios e cabos, e após fundidos e forjados.

Figura 2 - Informações sobre uso do alumínio em âmbito nacional



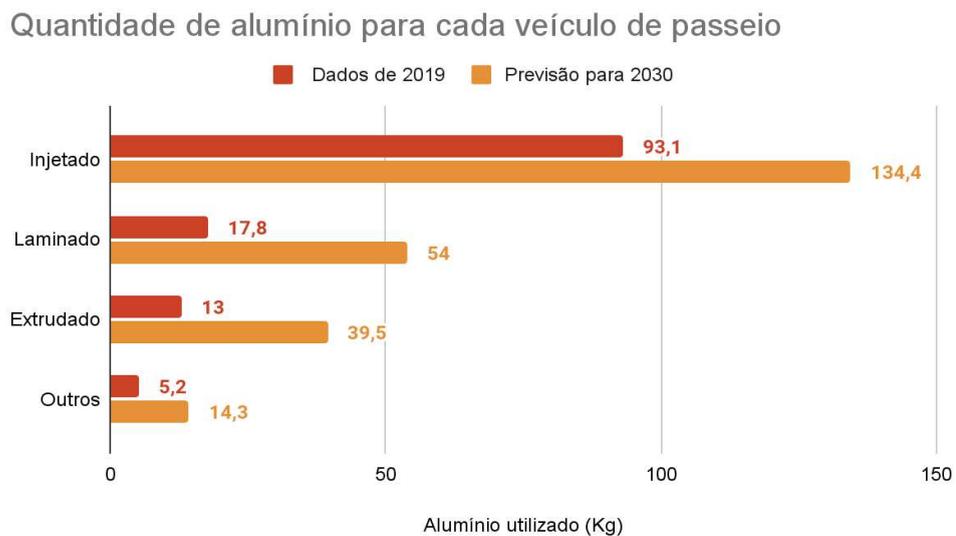
Fonte: ABAL (2021 b)

A indústria automotiva tem visto um crescimento significativo em suas vendas, porém esse crescimento se dá em duas situações diferentes, em países em desenvolvimento é possível observar uma grande procura por veículos de passeio e comerciais a combustão, já nos países desenvolvidos, avança rapidamente a venda de carros elétricos e autônomos (Mordor, 2022).

Segundo a IAL (2019), em 2019, na China, para cada veículo de passeio são empregados 129,1 Kg de alumínio e a previsão é que até 2030 esse número aumente para 242,2 Kg, distribuídos entre os processos de injeção, laminação, extrusão e outros.

A quantidade de alumínio para cada veículo de passeio segundo o tipo de processo encontra-se na Fig. 3, com valores de 2019 e a previsão para 2030.

Figura 3 - Informações sobre a quantidade de alumínio para cada veículo de passeio



Fonte: IAL (2019)

Segundo Mordor (2022) a maior máquina de injeção sob pressão foi construída pela empresa Giga Press Die-casting Machine em abril de 2021, esta que é denominada Dream Press 9000 toneladas, segundo a fabricante a máquina tem desempenho mais alto e maior faixa de aplicação principalmente para a indústria automotiva que necessita de peças únicas de grande porte.

2.1. PROCESSO DE INJEÇÃO SOB PRESSÃO

O processo de *HPDC* compreende a injeção sob pressão de um metal no estado líquido, este que dependendo do processo pode ser o alumínio, zinco ou magnésio, para dentro da cavidade de um molde (MALAVAZI, 2005).

Neste processo são obtidas peças de geometrias complexas através da injeção a alta pressão do metal líquido até o final da solidificação no molde, ainda é possível obter peças com excelente acabamento e precisão, sendo factível de serem utilizadas como produto final dependendo do processo (CARDINALI, 2011).

O processo de fundição sob pressão é considerado um processo com alta precisão sendo possível produzir peças com paredes finas (mínimo de 2,5 mm) e geometrias complexas, com precisão dimensional variando entre 0,05 e 0,25 mm (FALAVIGNA, 2014).

A massa das peças obtidas nesse processo variam de acordo com a máquina e necessidade do cliente podendo ser fabricadas peças entre 60 g até 64 kg, a rugosidade superficial da peça depende da qualidade de acabamento utilizada no molde e pode variar entre 0,4 μm à 3,2 μm (FALAVIGNA, 2014).

Mesmo com as várias vantagens de se utilizar um processo de injeção de alumínio sob pressão, o mesmo ainda pode apresentar limitações devido ao excesso de porosidade, a qual pode ocorrer durante o enchimento ou pela contração do alumínio na solidificação (BREVICK, 2009).

Para se obter um menor nível de porosidade na peça algumas variáveis do processo devem ser controladas entre elas estão a temperatura do metal e do molde, velocidade de primeira e segunda fase, pressão de recalque, pontos de encontro de frentes de alumínio fundido e a qualidade da liga (VERRAN, 2005).

Cada vez mais esse processo vem sendo utilizado e em maior variedades de produtos, isso se deve ao fato do processo permitir uma alta demanda que pode chegar a 200 peças por hora, para suprir essa necessidade é de extrema importância um estudo sobre o molde a ser utilizado (VENDRAMIM, 2020).

Tendo em vista a produção em larga escala das peças, o estudo a ser realizado, deve contemplar: material, tratamento térmico e condições de operação,

levando ainda em conta, o uso de simulações no desenvolvimento do molde (VENDRAMIM, 2020).

Na Figura 4 pode-se observar uma máquina utilizada para produção de peças no sistema de HPDC.

Figura 4 - Máquina HPDC



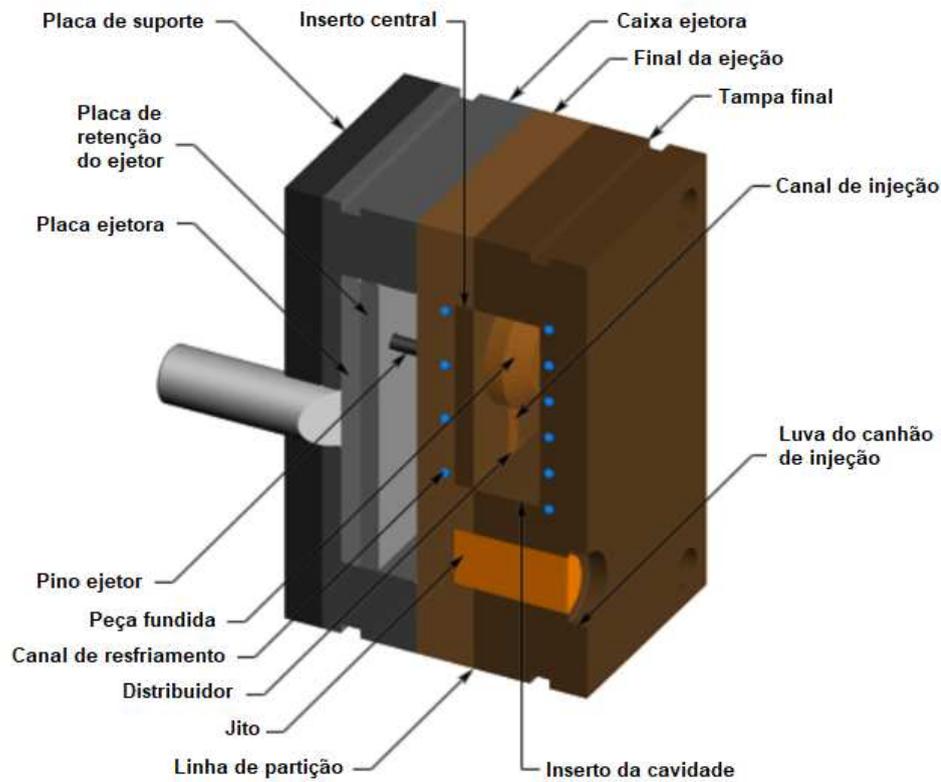
Fonte: ZITAI (2021)

2.2. MOLDE DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO SOB PRESSÃO

No projeto do molde de injeção de alumínio em alta pressão, para pequenos itens, normalmente utiliza-se um porta molde padrão que é constituído por placas as quais têm a função de acomodar cavidade da peça, auxiliar na injeção, resfriamento e abertura para retirada da peça.

De acordo com o projeto para peças grandes, também pode ser utilizado o porta molde, visando diminuir o tempo de troca de ferramentas. Na Figura 5 tem-se o exemplo de um porta molde.

Figura 5 - Porta Molde HPDC



Fonte: (source: www.custompartnet.com)

No projeto da cavidade alguns itens são essenciais para uma correta fabricação da peça, um destes itens é a bolacha, onde ocorre a entrada do material fundido. Após passar pela bolacha o metal corre pelo canal de entrada até a cavidade principal.

A cavidade que tem o formato da peça desejada e, para evitar o aprisionamento de ar na peça, ainda tem dois recursos que são as saídas de ar e as bolsas de sobra de material.

Para o projeto de uma ferramenta alguns aspectos precisam ser levados em consideração, entre eles estão manter a espessura da cavidade o mais constante possível e com raios grandes, posicionar os canais de refrigeração de forma a manter a temperatura o mais uniforme possível (Vendramim, 2020).

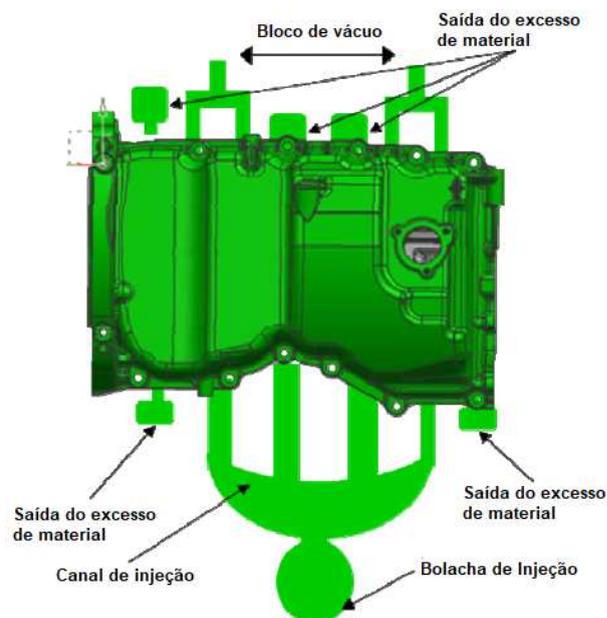
Em relação ao canal de injeção, deve-se definir de forma que a liga flua suavemente por todo seu caminho, e atentar-se às dimensões do canal pois são de grande importância para a velocidade do fluido (Vendramim, 2020).

Segundo Vendramim (2020) algumas cotas de projeto podem ser seguidas para uma melhor ferramenta:

- Distância entre a cavidade e superfície do molde maior que 50 mm
- A relação entre a profundidade e a espessura de parede do molde tem que ser menor que 1:3
- Distância entre a cavidade e o canal de refrigeração deve ser maior que 25 mm
- Distância entre o canal de alimentação e a parede da cavidade deve ser maior que 50 mm

Na Figura 6 tem-se um exemplo de cavidade de molde onde pode-se observar importantes itens no projeto de um molde de HPDC, como o bloco de vácuo, bolacha de injeção, canal de injeção e a saída do excesso de material.

Figura 6 - Exemplo de cavidade de HPDC



Fonte: Hong e Kwang (2013)

É importante ao projetar um molde evitar cantos vivos, frisos, furos e superfícies com alta rugosidade superficial, pois esses são concentradores de tensão que somadas às tensões térmicas, têm tendência a dar origem às trincas térmicas. (NADCA, 2009).

Para aumentar a vida útil de um molde de injeção de alumínio alguns itens devem ser observados, entre eles estão distribuir os canais de refrigeração de forma a evitar gradientes de temperatura no molde, respeitar as distâncias mínimas para canais, cavidade e gates, e dimensionar o molde corretamente para a injetora a ser utilizada (VENDRAMIM, 2020).

Durante o uso do ferramental, deve-se tomar atenção à preparação do mesmo, antes de iniciar a injeção. A cada ciclo de entrada do molde na máquina, o mesmo deve ser pré aquecido até a temperatura de uso (NADCA, 2009).

Com o pré aquecimento, evita-se o grande gradiente de temperatura do contato do alumínio fundido com o molde frio, este que por sua vez, é um dos grandes responsáveis pela formação de microtrincas nos moldes, que uma vez criadas crescem rapidamente até a falha total da matriz.

O pré aquecimento tem sua importância levando em conta as propriedades mecânicas, tendo em vista que a resistência ao impacto do molde aumenta significativamente com o aquecimento (NADCA, 2009).

Para confecção dos moldes de HPDC, são utilizados aços ferramentas de trabalho a quente, estes que são aços de alta liga utilizadas amplamente em ferramentas da indústria mecânica e automotiva, sendo normalmente utilizados para conformação a quente (fundição sob pressão, extrusão e forjamento) de ligas ferrosas e não ferrosas (GONÇAVES, 2012).

Entre os aços ferramentas para trabalho a quente os mais utilizados para moldes são os aços AISI H11, H13, H20, H21 e H22, dentre os pontos de interesse para escolha desses são a elevada estabilidade dimensional, resistência a trincas térmicas, bom desempenho nas condições de uso, boa temperabilidade, usinabilidade e resistência ao desgaste (ASSUNÇÃO JUNIOR, 2015).

Os aços para *HPDC* podem ser divididos em 8 famílias, sendo elas A (AISI H13 Premium), B (AISI H13 Superior), C (DIN 2367 e modificado), D (AISI H11 / DIN 2343), E (AISI H11 Modificado Superior), F (AISI H11 Modificado Premium), G (DIN 2367 Modificado Cr. Reduzido) e H (DIN 2367 Modificado Mo. Reduzido). Sendo as principais e mais usadas para HPDC as famílias C, E, G e H (ARIETA,2021)

Alguns exemplos de aços utilizados na família C: Dievar, DAC Magic, Thermodur 2367 Super Clean; Na família E: W400 isobloc, Thermodur E38K, Vidar

Superior; Na família G e H, respectivamente, VH Super e Thermodur E40K superclean (ARIETA,2021).

O processo de tratamento térmico é ao menos tão importante quanto a escolha do aço. As trincas por fadiga térmica são reduzidas consideravelmente utilizando temperaturas de austenitização que permitem a máxima quantidade de carbonetos em solução sólida na austenita (VENDRAMIM, 2020, p.8).

Entre os processos de tratamento, o mais utilizado pelos fabricantes de ferramental, é a têmpera a vácuo por gerar menor deformidade superficial, ter aquecimento e resfriamento mais homogêneo, conseguir maior controle do processo (VENDRAMIM, 2020).

A têmpera a vácuo possibilita melhor propriedade mecânica, além de não ter agentes agressores à superfície e permitir resfriamento rápido por nitrogênio em alta pressão (VENDRAMIM, 2020).

Ainda na questão de tratamentos térmicos, é possível realizar a aplicação de revestimentos superficiais, os quais têm a função de aumentar a vida útil da ferramenta, através do aumento da dureza superficial, protege a cavidade de danos causados por erosão e agarre de material por dificultar a reação da liga fundida com o aço do molde (MITTERER, 2003).

Dentre as tecnologias de revestimentos superficiais uma delas tem grande aceitação pelas fabricantes de ferramentais que é a deposição física a vapor (*Physical Vapor Deposition - PVD*), dentre as opções os mais utilizados são de TiN, TiCN, AlTiN e AlTiCrN por elevar o rendimento dos moldes de *HPDC* levando em conta características mecânica e químicas (MITTERER, 2000).

2.3. FALHAS NO MOLDE

Cerca de 75% das falhas, nos moldes de injeção de alumínio, estão relacionadas às microtrincas . Outros fatores que, também, levam à falha do molde são a erosão, o desgaste e as trincas grosseiras. Em menor quantidade a corrosão e a aderência também podem levar à falha (Arieta, 2021).

Segundo Arieta (2021) os principais mecanismos de falhas em moldes são:

- Microtrincas:

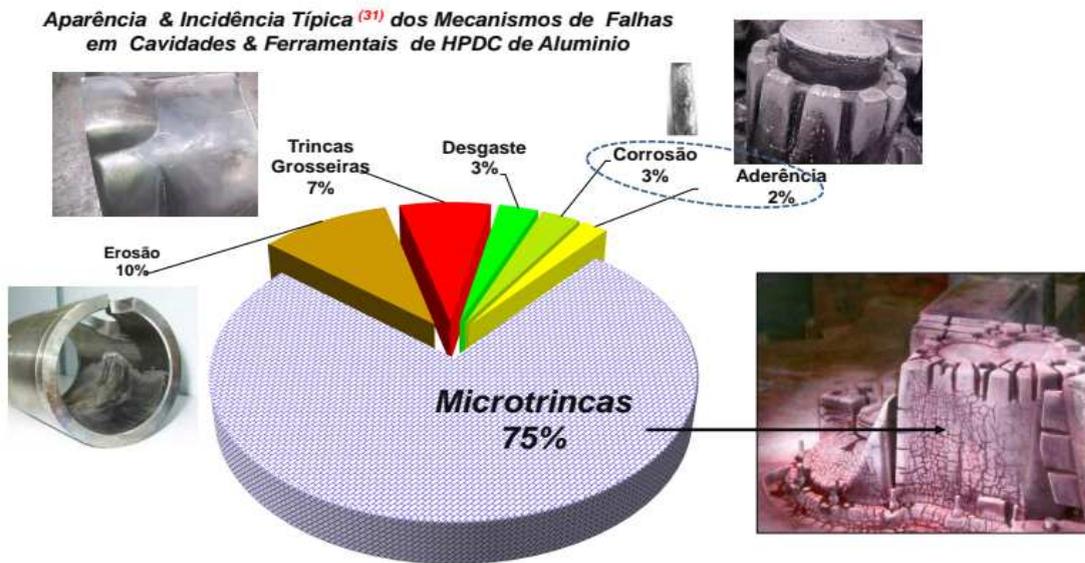
- Responsáveis por 75% das falhas em moldes de HPCD é de grande complexidade e são influenciadas por vários fatores, entre eles a tensão térmica, composição química do material, acabamento superficial.
- A maior causa de microtrincas provém da tensão térmica no aço, que tem origem da diferença de temperatura entre o molde e a liga de alumínio a ser injetada e, também, muitas vezes do elevado número de ciclos aplicados ao molde, obrigando a um resfriamento entre ciclos rápido causando o choque térmico.
- A composição química do aço do molde influencia na formação das microtrincas, pois alguns metais elevam a resistência do aço à fadiga térmica e outros a reduzem, para uma melhor resistência são indicados aços com maior teor de Mo e reduzido teor de Si e V. Ainda na composição química do material a micro limpeza do aço, também, se faz importante na origem das microtrincas, quanto mais limpa a microestrutura do aço for melhor será sua resistência à microtrincas,
- Outro fator que também influencia é o acabamento superficial do molde, quanto melhor o acabamento menos propenso a criação de microtrincas o molde será.
- Erosão e desgaste
 - A erosão tem origem de esforços mecânicos causados pelo impacto do alumínio líquido com a superfície do molde, também, pode ocorrer pela implosão de bolhas de gases dentro de fluxo do alumínio líquido sob pressão.
 - O desgaste tem origem nos esforços mecânicos e químicos que ocorrem com o tempo na peça, diferente da erosão que é um processo mais rápido o desgaste ocorre com o tempo até chegar em níveis que a peça precisa ser retrabalhada.
 - As erosões podem ser minimizadas com a redução do teor de Si na liga, diminuindo a velocidade e pressão de injeção, utilizando

softwares CAE para simulação de pontos de contato e com revestimentos na superfície do molde.

- Trincas grosseiras
 - Em geral causadas por falhas de projeto e, também, por aço ou tratamento térmico inadequados.
 - Podem ser minimizadas com um tratamento térmico de alívio de tensões.
- Corrosão e aderência
 - Tem origem na reação química entre o ferro contido no aço da cavidade e o alumínio da liga injetada.
 - Na corrosão o ferro na parte externa do molde se dissolve no alumínio líquido causando a perda do material e deterioração química da superfície.
 - A aderência ocorre em pontos menos quentes do molde e com menor tempo de contato, deixando camadas finas de intermetálicos que aderem a superfície do molde.
 - Em geral a aderência e a corrosão podem ser minimizados com uso de ligas de alumínio com porcentagem de Fe aumentada, diminuindo a velocidade e pressão de injeção e também com o uso de softwares CAE.

Na Fig. 7 pode-se observar um gráfico dos mecanismos de falha mais recorrentes.

Figura 7 - Mecanismos de falha



Fonte: Arieta (2021)

A maior causa das falhas em moldes de *HPDC* é a fadiga térmica, que é causada pelo contato repetitivo da liga, que normalmente se encontra perto de 700 °C, com o molde a 200 °C, esta fadiga com o tempo se reflete em trincas térmicas, que com o tempo se propagam em direção do centro do molde, especialmente se estiver exposta à oxidação. As trincas térmicas comprometem a qualidade superficial da peça, levando com o tempo ao fim da vida útil do molde (ROSSO, 2017).

As trincas térmicas geralmente são formadas pelo gradiente de temperatura originário da ciclagem nas regiões próximas à superfície do molde, normalmente gerado pelo aquecimento ao entrar em contato com o alumínio e resfriamento após a retirada da peça e com o desmoldante (GONÇALVES, 2012).

Ao ocorrer o aquecimento da área superficial a tendência seria a expansão da superfície o que é restringido pela parte inferior estar mais fria, e ao aplicar o desmoldante a área superficial fica mais fria que o resto da peça levando ao movimento de contrair e expandir, e quanto maior o gradiente de temperatura, mais elevadas são as tensões e maior é a propensão ao surgimento de microtrincas (GONÇALVES, 2012).

Outra falha recorrente em moldes de injeção de alumínio é a aderência da liga no molde, acontece aos poucos quando uma pequena quantidade do alumínio

adere em um ponto devido a uma falha ou algum canto e aos poucos com os ciclos essa camada aumenta até impossibilitar a retirada de peças boas (ROSSO, 2017).

Um defeito recorrente em peças injetadas de alumínio são as juntas frias e essas ocorrem devido ao enchimento inadequado do molde por diversos fatores, as juntas frias acontecem quando uma frente de alumínio mais fria encontra com uma frente quente, geralmente um gradiente acima de 30 °C, já é considerado de risco para o aparecimento de juntas frias (ROSSO, 2017).

Cabe ressaltar que atualmente alguns softwares *CAE* realizam com grande precisão a análise da fadiga térmica nos moldes, possibilitando desta maneira uma boa alternativa de verificação e de escolha de materiais das cavidades dos moldes pelos projetistas.

2.4. SOFTWARES *CAE* UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS DE INJEÇÃO DE ALUMÍNIO

O uso de softwares *CAE* é de grande auxílio para os profissionais ajudando a gerar, verificar, validar e otimizar as soluções de design e processos. Economicamente falando, a tecnologia *CAE* é o que temos de melhor para análise de qualidade e defeitos, podendo prevê-los antes mesmo da fabricação do ferramental tendo um custo muito menor (HONG, 2013).

A utilização de simulação para análise de enchimento de moldes é de grande importância, desde a fabricação do molde, com a localização de canais de entrada de material e saídas de ar, e, também, após a fabricação para setagem dos parâmetros do processo.

Devido ao alto custo envolvido na fabricação de um ferramental de *HPDC*, o uso da simulação é imprescindível, evitando gastos desnecessários e retrabalhos (REBELLO, 2000).

A análise térmica de uma simulação para um molde permite a previsão de um conjunto de informações necessárias para a construção de um molde, definição de processo, avaliação de vida útil e possíveis deformações (TSENG, 1992).

Para a peça, a simulação pode trazer dados de campos de tensão, pontos frágeis, defeitos provenientes de contração e porosidade, com isso permitindo-se

ajustar os parâmetros, canais de injeção, refrigeração e saídas de ar (TSENG, 1992).

Alguns dos softwares de simulação mais utilizados para HPDC, são: o MAGMASOFT®, ProCAST®, QuikCAST® e o AnyCasting®, cada um deles com suas interfaces porém com funções e usos parecidos, sendo que cada software usa sua própria rotina matemática para realizar as simulações.

O MAGMASOFT® emprega o método das diferenças finitas para resolver a transferência de calor e massa em uma malha retangular, sendo uma ferramenta útil para simular o fluxo de metal fundido em um molde permanente.

Já o ProCAST® e o QuikCAST® utilizam elementos finitos, que trabalham totalmente em problemas tridimensionais e produzem malhas tetraédricas. Eles fornecem a análise de estresse de fluxo térmico acoplado com base no método dos elementos finitos.

O ProCAST® permite ao usuário personalizar a maior parte do processo, incluindo os parâmetros de execução, nele os limites podem ser atribuídos em formas de nó, superfície, interface e volume (WANNARUMON,2009).

Alguns parâmetros são importantes para obter uma melhor qualidade na injeção, como explica Verran (2005):

- Velocidade lenta de injeção- comumente chamada de velocidade de primeira fase, contempla desde o início da movimentação do pistão, até o material chegar a entrada da peça (final do canal de injeção), velocidades excessivas podem gerar turbulência e porosidade
- Velocidade alta de injeção - geralmente chamada de velocidade de segunda fase, contempla do começo do enchimento da peça até o fim do preenchimento, velocidades muito lentas podem gerar solda fria e falhas no enchimento, velocidades muito altas podem gerar porosidade.
- Pressão de recalque - Também chamada de pressão de terceira fase, ocorre após o enchimento completo da peça e tem a função de manter o alumínio líquido pressionando contra a parede do molde evitando assim os rechupes causados pela contração térmica da solidificação

do alumínio , caso demore a ocorrer pode causar rechupes e porosidade.

Além dos parâmetros já citados, entre os fatores controláveis do processo, que não exigem alterações no projeto do molde, também são importantes, a temperatura do metal, curso da primeira fase de injeção e temperatura do molde (VIANA, 2013).

3. METODOLOGIA

Primeiramente para início do trabalho foram realizadas pesquisas ao redor do tema de fundição de alumínio sob pressão, a fim de refinar o embasamento teórico sobre o tema, após, foi definida a peça a ser simulada, a mesma foi obtida em modelo digital 3D, e, após, foram definidos os parâmetros que foram utilizados na injeção, com isso pôde-se realizar e analisar as simulações.

3.1. PEÇA A SER SIMULADA

Como o objetivo deste trabalho é demonstrar a utilidade de uma simulação CAE para o projeto de um molde de injeção de alumínio sob pressão, foi utilizada uma peça que está em processo de melhoria de produto, por uma empresa do ramo metal mecânico, a qual será alterado o design e com isso será necessária a fabricação de um novo molde.

Na Figura 8 pode-se observar o modelo 3D da peça escolhida para ser simulada, a qual consiste na tampa de um servo motor e faz parte de um plano de atualização de uma linha de produto.

Figura 8 - Modelo 3D da tampa do servo motor



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 9 verifica-se um exemplo de servo motor.

Figura 9 - Exemplo de servo motor



Fonte: Silveira (2016)

3.1.1. Validação da peça

A validação da peça enviada pela área de projeto é de extrema importância para a fabricação do molde, e alguns pontos importantes foram observados, entre eles dois principais, evitar canais de entrada de material e saídas de ar nas extremidades de fechamento e possibilitar usinagem no anel central para ajuste do eixo.

3.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Com base nos estudos iniciais, foram observados alguns parâmetros a serem definidos, entre eles: a velocidade de injeção, pressão de recalque, temperatura da liga de alumínio, liga a ser utilizada e a temperatura e material do molde.

Para isto, os parâmetros foram definidos com base na experiência de projeto, necessidades e limitações impostas pela empresa levando em conta que a injetora que receberá o molde é utilizada para produção em larga escala e com grande diversidade de peças.

3.3. SIMULAÇÃO CAE

Para a simulação, foi utilizado o software QuikCAST®, da empresa ESI Group, este que neste estudo possibilita a realização das simulações e também a análise das mesmas.

3.3.1. Método utilizado nas simulações

Para a realização das simulações primeiro foi importado do *SolidWorks* o modelo, com isso foi possível a realização da malha superficial na aplicação Visual-Mesh do software QuikCAST®.

Para realizar a entrada dos parâmetros e condições de contorno da simulação foi utilizada a aplicação Visual-Cast, na sequência foi gerada a malha volumétrica, sendo possível, com isso, gerar as simulações.

Para análise das simulações, foi utilizado a aplicação Visual-Viewer, onde pode-se retirar os resultados da simulação, análises estas, que foram realizadas, com o auxílio das experiências obtidas em pesquisas e vivência de fábrica no dia a dia.

3.3.2. Método utilizado para análise das simulações

Na análise da simulação, primeiramente, se escolhe o ponto de entrada de material ideal, para isto, foi observado o enchimento e temperatura da liga no interior da peça, a fim de observar possíveis locais com falta de material e juntas frias.

Posteriormente, observou-se a porosidade em cada simulação, com o objetivo de evitar porosidade nos pontos de interesse. Na sequência, foi analisada a pressão máxima de ar, com o intuito de evitar o aprisionamento de ar dentro da peça, e por fim foram analisados o tempo de enchimento e solidificação.

Já com a entrada do material definida, foi realizada a colocação das saídas de ar nos pontos críticos e novamente realizada a análise.

4. DADOS DE PROCESSO E SIMULAÇÃO

Para a simulação, alguns parâmetros de processo importantes foram observados, por se tratar de uma peça que será fabricada em uma máquina específica e que fabrica outros moldes, deve-se modifica-los somente em caso de extrema necessidade, entre eles a velocidade de segunda fase, esta que no pistão é de 3m/s.

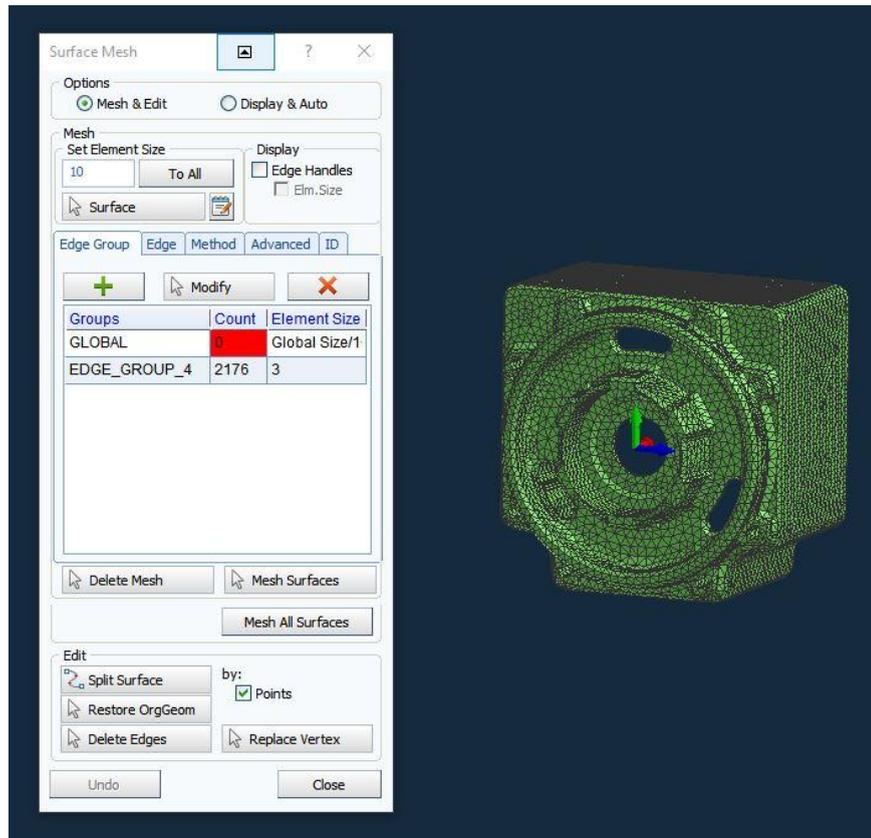
Outro fator que influencia na injeção é a temperatura da liga segundo dados retirados de moldes semelhantes o alumínio é dosado a 710 °C, porém com a perda térmica entra na cavidade a 605°C.

Um fator importante para a simulação é a temperatura do molde, os quais contam com sistema de aquecimento inicial e trabalham em cerca de 300 °C. A liga utilizada é a SAE 305 e o material utilizado para fabricação do molde é um aço ferramenta para trabalho a quente, mais especificamente, o H13.

Para início da simulação foi preciso gerar a malha 2D, superficial, a qual possibilita a setagem dos parâmetros, tendo em vista que onde são encontradas paredes finas precisam ter pelo menos 2 elementos de malha para uma boa qualidade, foi gerada a malha na função automática somente utilizando um tamanho de elemento de 3mm.

Na Figura 10 observa-se a geração da malha superficial.

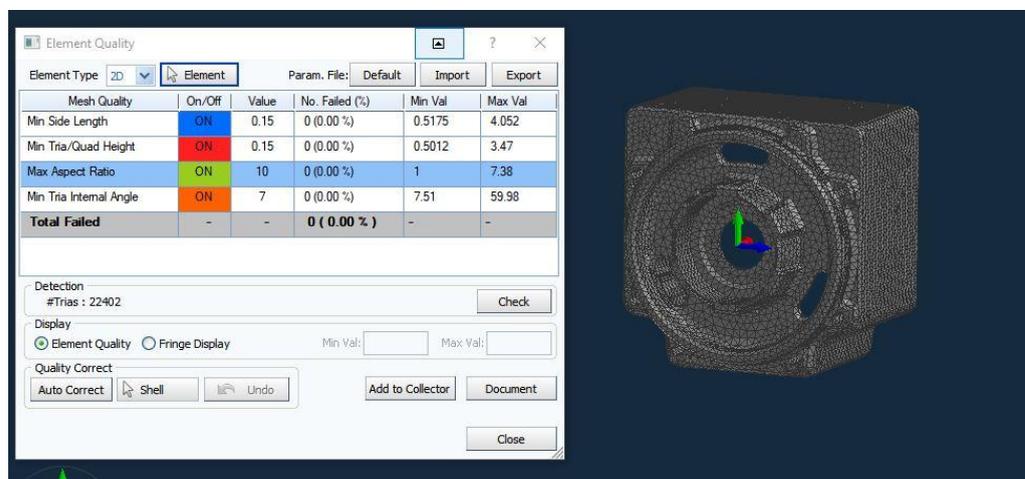
Figura 10 - Malha superficial



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 11 pode-se observar a qualidade da malha superficial, análise essa gerada pelo software, onde é possível verificar que não foram encontrados erros na malha.

Figura 11 - Qualidade da malha superficial

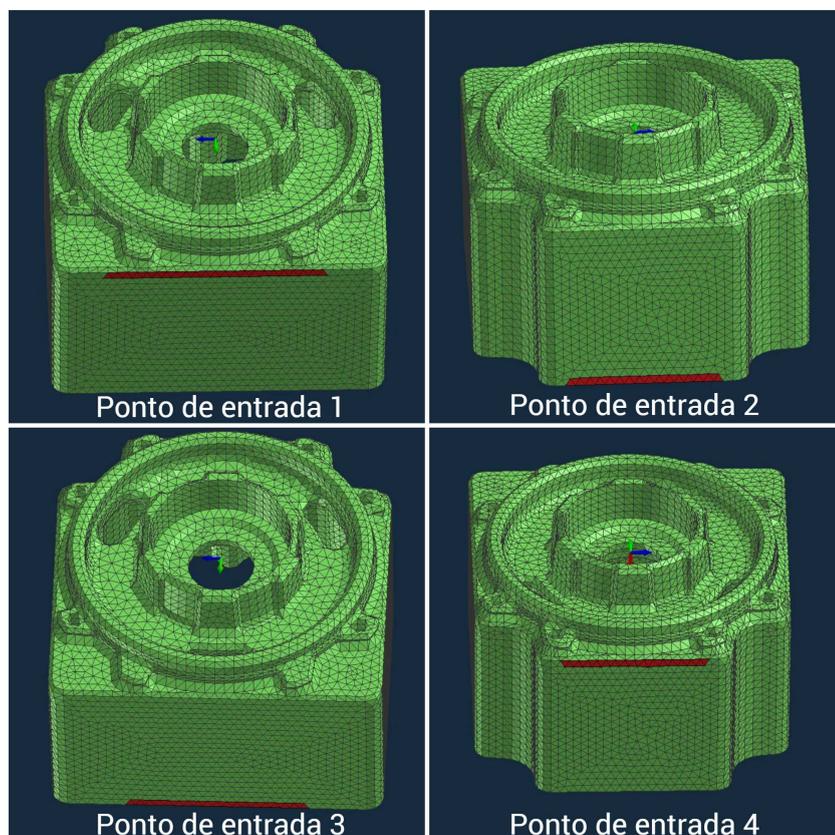


Fonte: Autor (2022)

Após a geração da malha foi preciso definir os possíveis pontos de entrada de material na peça, para isso foi levado em conta que se trata de uma peça que necessita fechamento em sua base inferior, e para evitar um processo de acabamento na mesma, não deve-se utilizar a área para injeção.

Com essas informações, 4 pontos de entrada lógicos foram utilizados, estes escolhidos levando em consideração a simetria da peça. Os pontos de injeção analisados podem ser observados na Fig.12.

Figura 12 - Pontos de entrada

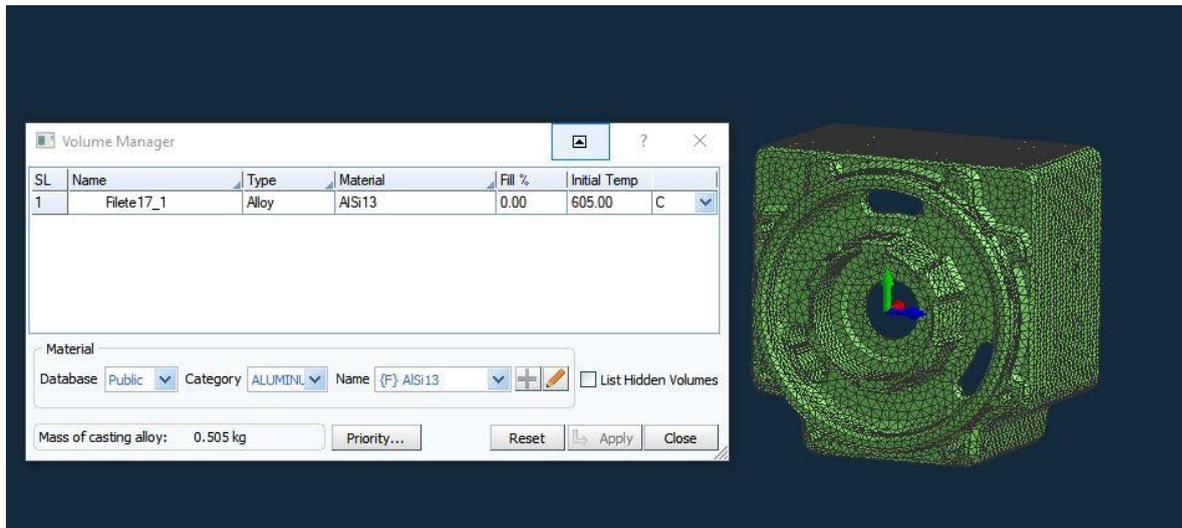


Fonte: Autor (2022)

Para a escolha no software da liga SAE 305 foi observada a composição da mesma, a qual é uma liga Al-Si composta de 11-13% de silício, dentre os materiais disponíveis pelo software foi encontrada a liga AlSi13, a qual se aproxima muito da liga utilizada pela empresa.

Na Fig. 13 é possível observar a tela de escolha da liga e da temperatura inicial.

Figura 13 - Dados da Liga

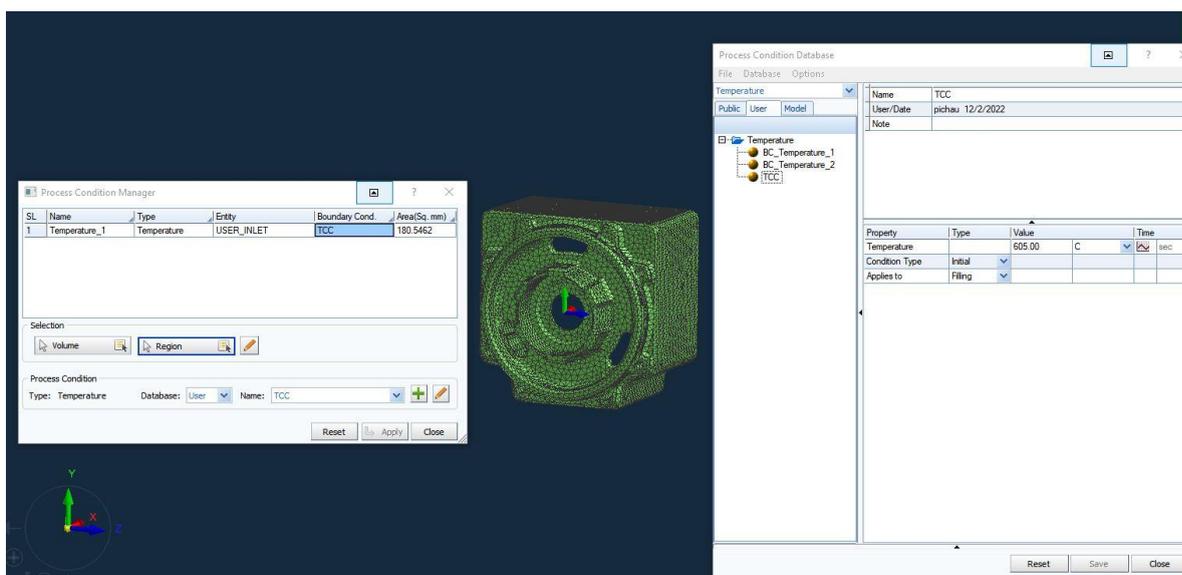


Fonte: Autor (2022)

Para realização da simulação alguns parâmetros de processo precisam ser apresentados, entre eles estão dados de temperatura, molde, velocidade de injeção, pressão de terceira fase e perda de calor.

Primeiramente foi apresentada a temperatura de entrada , 605 °C, e o local onde ela ocorre, que seria o ponto de entrada na peça, como pode ser observado na Fig. 14.

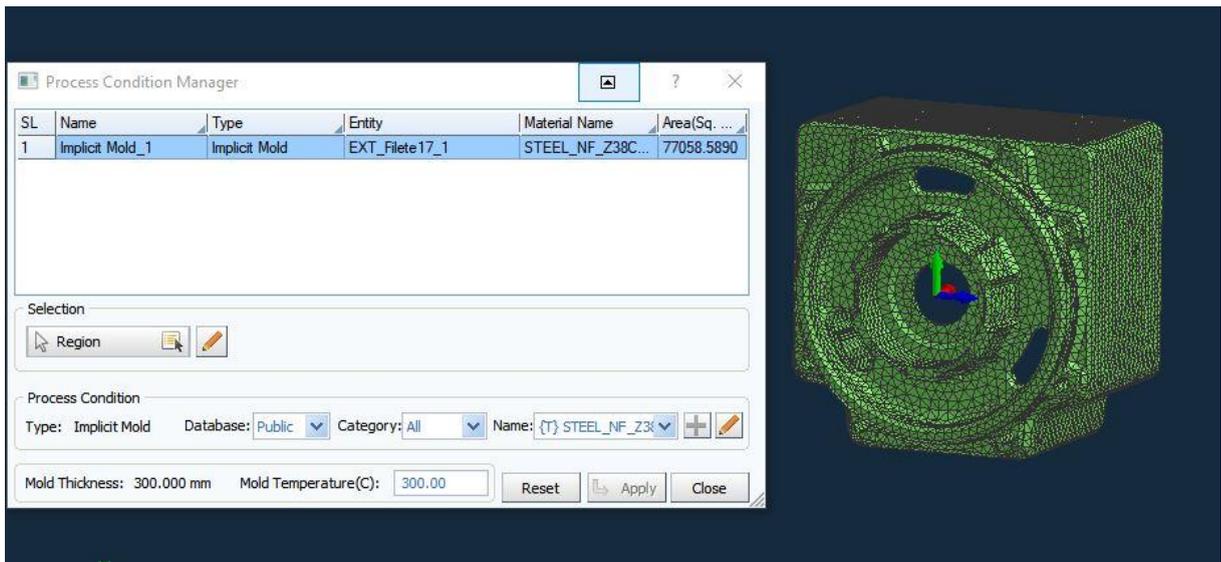
Figura 14 - Dados de temperatura



Fonte: Autor (2022)

Por ser uma simulação de peça para auxiliar na confecção do molde, foi utilizado um molde implícito o qual foi considerado com uma espessura ao redor da peça de 300mm e temperatura de trabalho de 300 °C, ainda foi especificado o material H13 o qual no software é codificado com o nome de STEEL_NF_Z38C, como pode ser observado na Fig. 15.

Figura 15 - Dados do molde implícito



Fonte: Autor (2022)

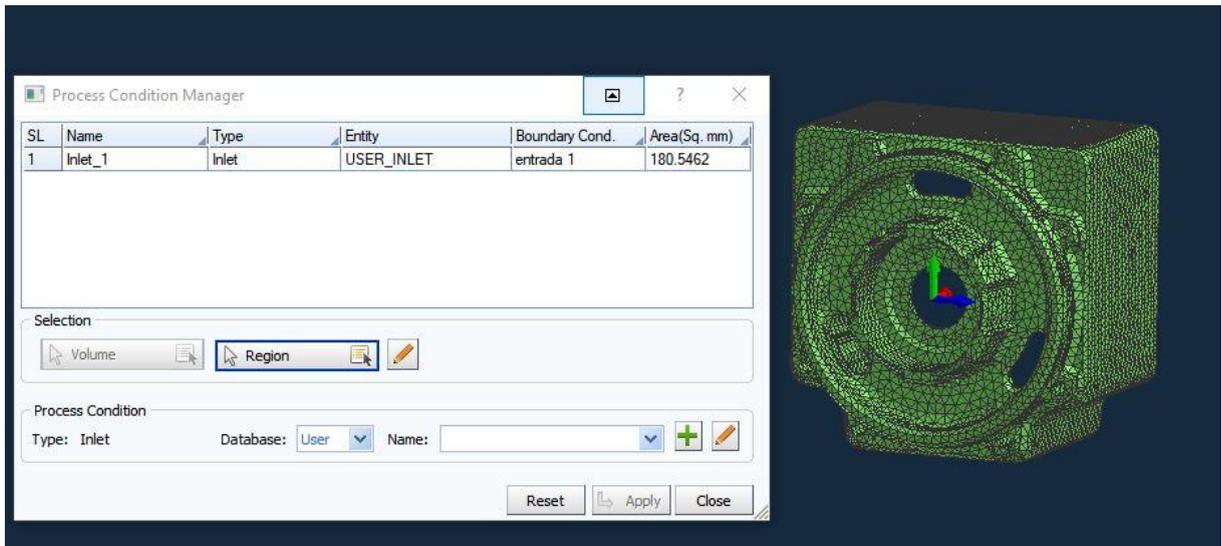
Para a velocidade de entrada do material na peça foi levado em conta a velocidade da máquina no pistão que é de 3 m/s e a área da seção transversal do mesmo, o qual tem um diâmetro de 120 mm.

Também foi considerada, a área da entrada do material na peça e quantidade de cavidades, no caso 4. A área de contato do pistão tem 11.309,73 mm², as áreas da entrada 1, 2, 3 e 4 têm respectivamente 180,5482, 125,0292, 139,2821 e 126,8547 mm², dados retirados do software QuikCAST® .

Através da equação da continuidade $Z = S * v$, onde Z é a vazão, S a área da seção transversal e v a velocidade do fluido, foi possível chegar às velocidades de entrada do alumínio para os pontos de entrada 1, 2, 3 e 4, sendo elas 46,98, 67,84, 60,90 e 66,87 m/s.

Na Figura 16, pode-se observar para a entrada 1 a área da superfície e a condição setada para a entrada 1.

Figura 16- Dados de entrada de material



Fonte: Autor (2022)

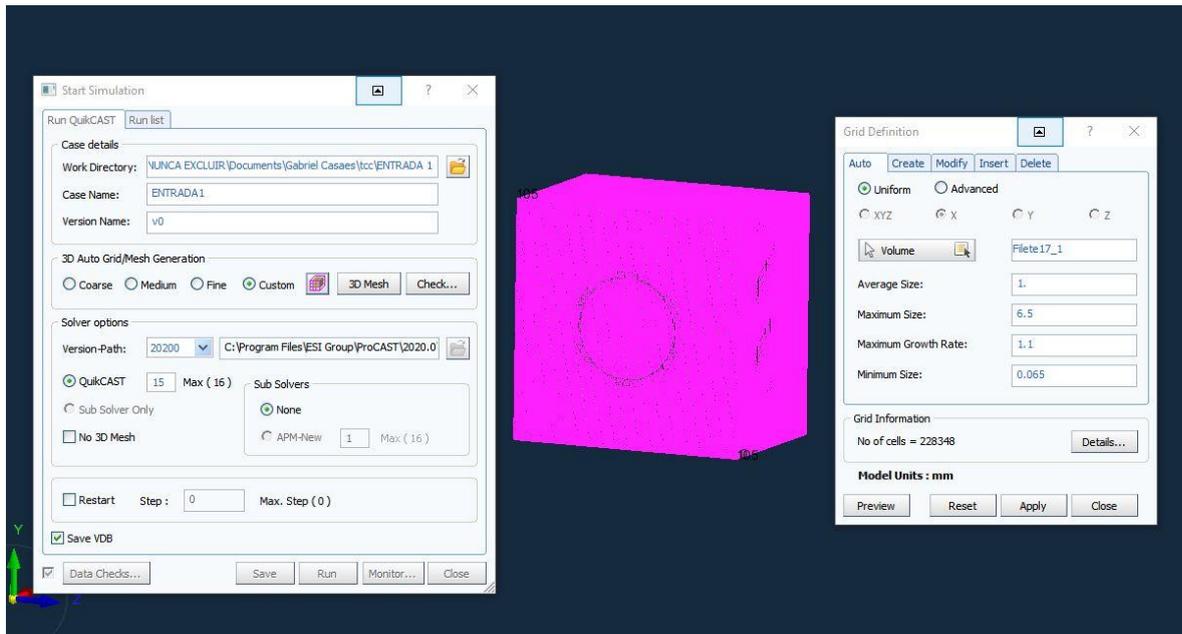
Além desses parâmetros de processo referente a máquina, molde e material, também foram escolhidos para uma correta simulação a condutância térmica do contato entre a liga de alumínio e o aço H13, sendo esse um valor padrão definido pelos materiais a pressão de terceira fase a qual também foi utilizada um valor padrão para simulações onde se usa molde implícito.

Alguns parâmetros de simulação também precisam ser apresentados ao software para um correto funcionamento, entre eles estão o tipo de injeção, tipo de simulação e quais dados necessita na saída.

Os parâmetros utilizados para esse caso foram: injeção sob pressão, com simulação térmica e de fluxo, observando como principais saídas a temperatura, pressão de ar, porosidade, tempos de enchimento e solidificação e fração do alumínio sólido e líquido.

Para realização da simulação, por fim é necessário a geração de uma malha volumétrica (3D), que foi realizada no modo automático porém entrando com o tamanho médio de elemento de 1 mm^3 , o que já nos possibilita resultados precisos, como pode ser observado na Fig. 17.

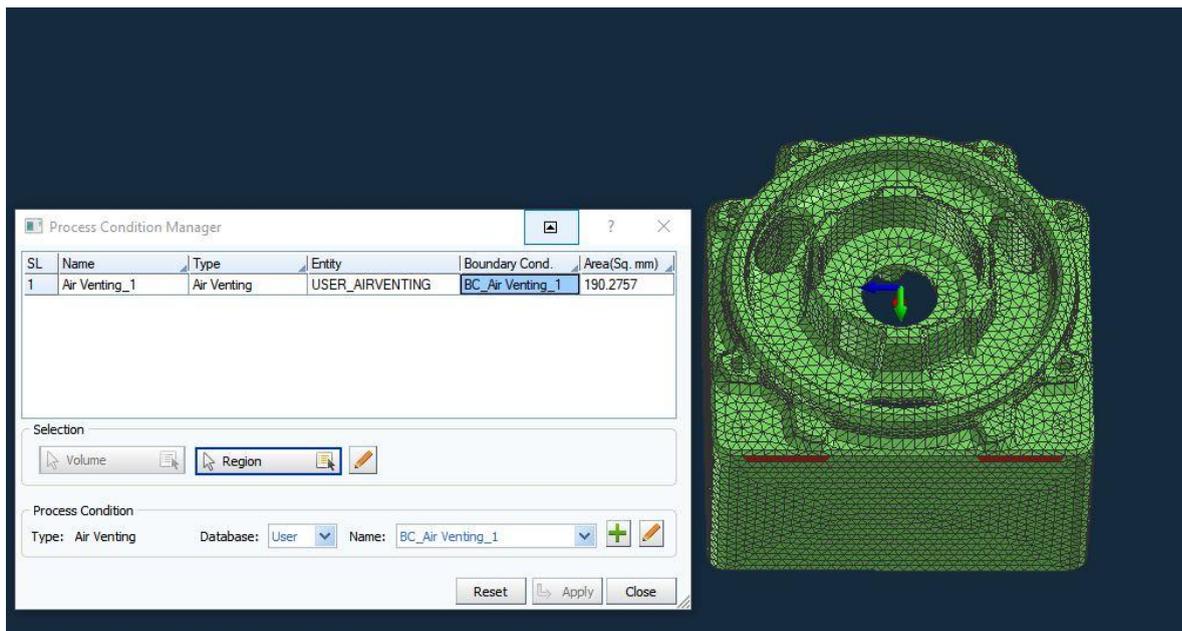
Figura 17 - Malha volumétrica



Fonte: Autor (2022)

Após a análise das simulações iniciais variando os pontos de entrada e análise das mesmas, como o ponto de entrada já definido, foi adicionada a simulação, os pontos de saída de ar conforme demonstrado na Fig. 18.

Figura 18 - Dados de saída de ar



Fonte: Autor (2022)

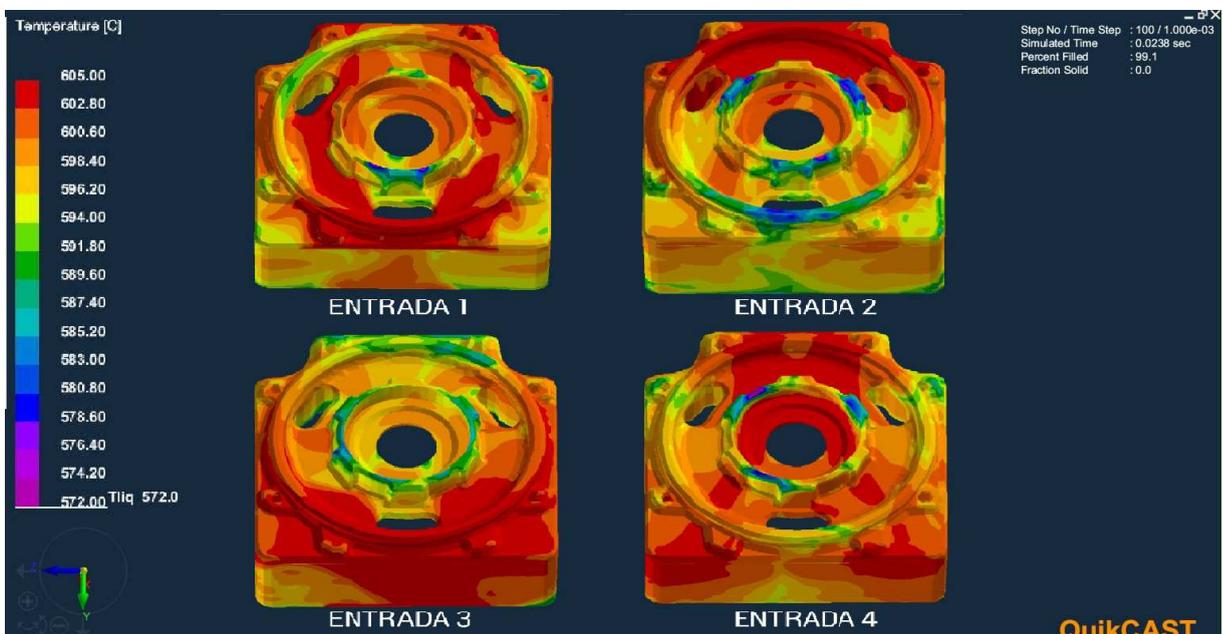
5. ANÁLISE DA SIMULAÇÃO

Para a realização da análise da temperatura deve-se observar a diferença de temperatura entre o ponto mais quente e o ponto mais frio na peça ao final do enchimento, por requisitos utilizados em empresas do ramo de fundição de alumínio sob pressão, não podem ocorrer diferenças de temperatura superiores a 30 °C.

Além disso, deve-se observar possíveis pontos onde o material fica abaixo da temperatura de solidificação, que podem causar, além de solda fria, o preenchimento incorreto do molde.

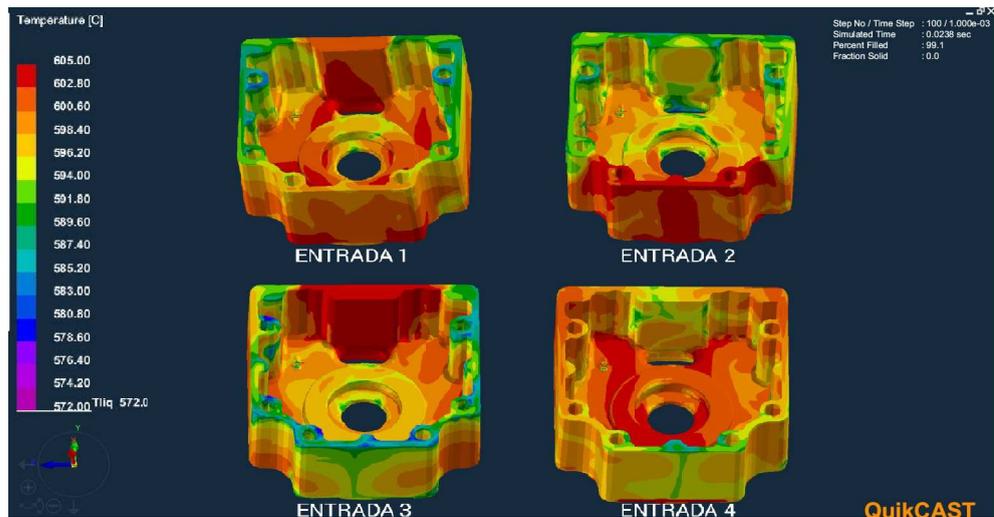
Pela análise das Figuras 19 e 20, pode-se verificar uma diferença de temperatura, para todos os métodos de entrada, entre o ponto mais frio e o mais quente menor que 30 °C, além disso não nota-se pontos de alumínio solidificado durante o enchimento, estando todos os métodos dentro do esperado.

Figura 19 - Análise da temperatura 1



Fonte: Autor (2022)

Figura 20 - Análise da temperatura 2

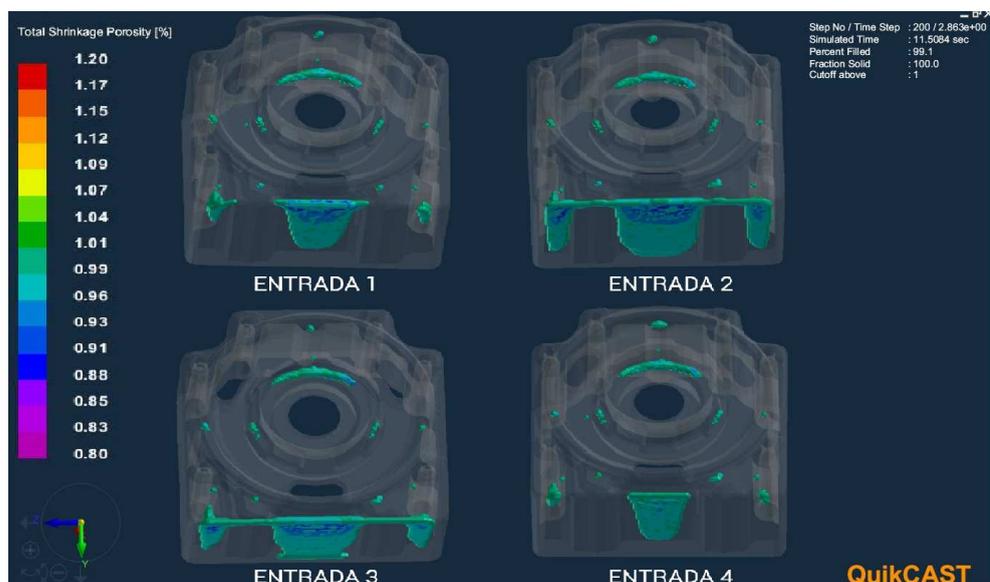


Fonte: Autor (2022)

A porosidade na peça é um dos requisitos de corte mais importantes para peças de injeção de alumínio sob pressão, pois a mesma reduz a resistência mecânica da peça e favorece o aparecimento de trincas.

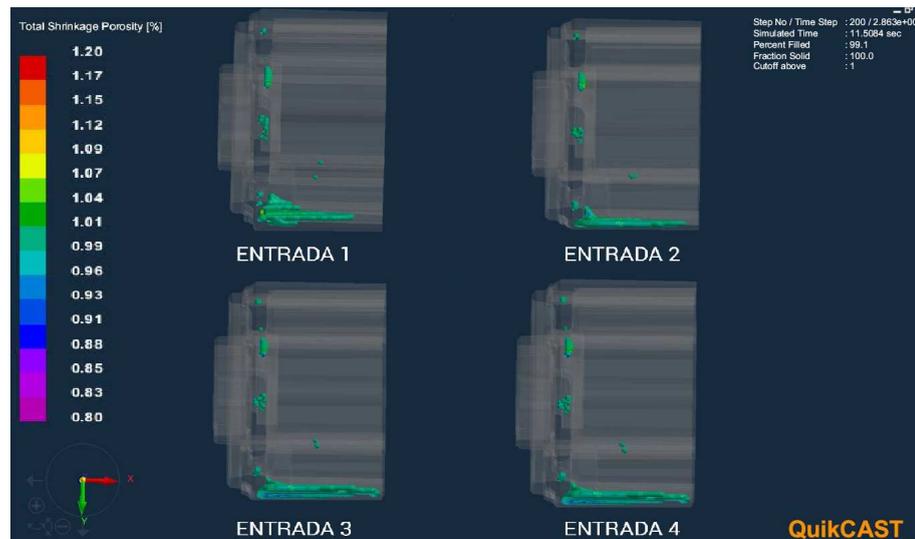
Pela análise das Figuras 21 e 22, verifica-se que nos métodos de entrada propostos 1 e 4 apresentam menos pontos de porosidade que os demais, em destaque está o 4 por ter menor quantidade e em menor nível. Além disso, os pontos de passagem do eixo e face de fechamento são pouco afetados.

Figura 21 - Análise de porosidade 1



Fonte: Autor (2022)

Figura 22 - Análise de porosidade 2

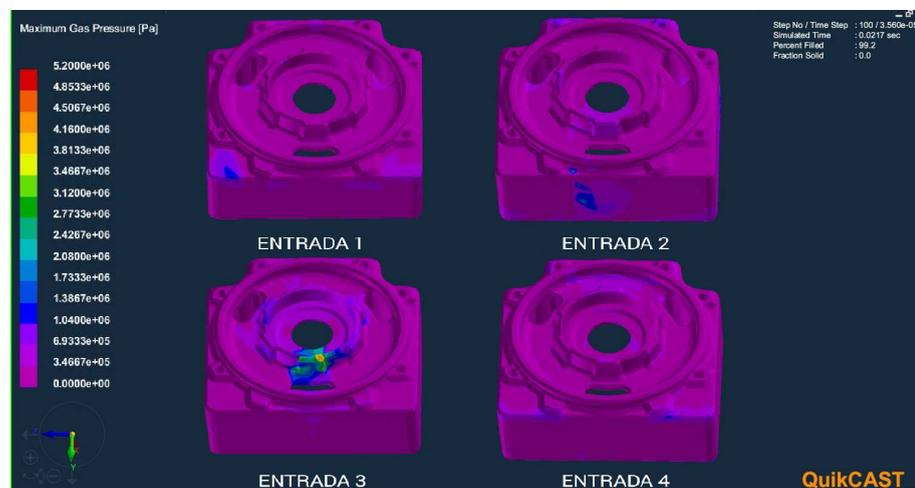


Fonte: Autor (2022)

A análise da máxima pressão dos gases dentro da peça se faz importante para o projeto das saídas de gases, estas que são de grande importância para evitar os acúmulos de gases no interior da peça e defeitos superficiais pelo aprisionamento de micro-bolhas.

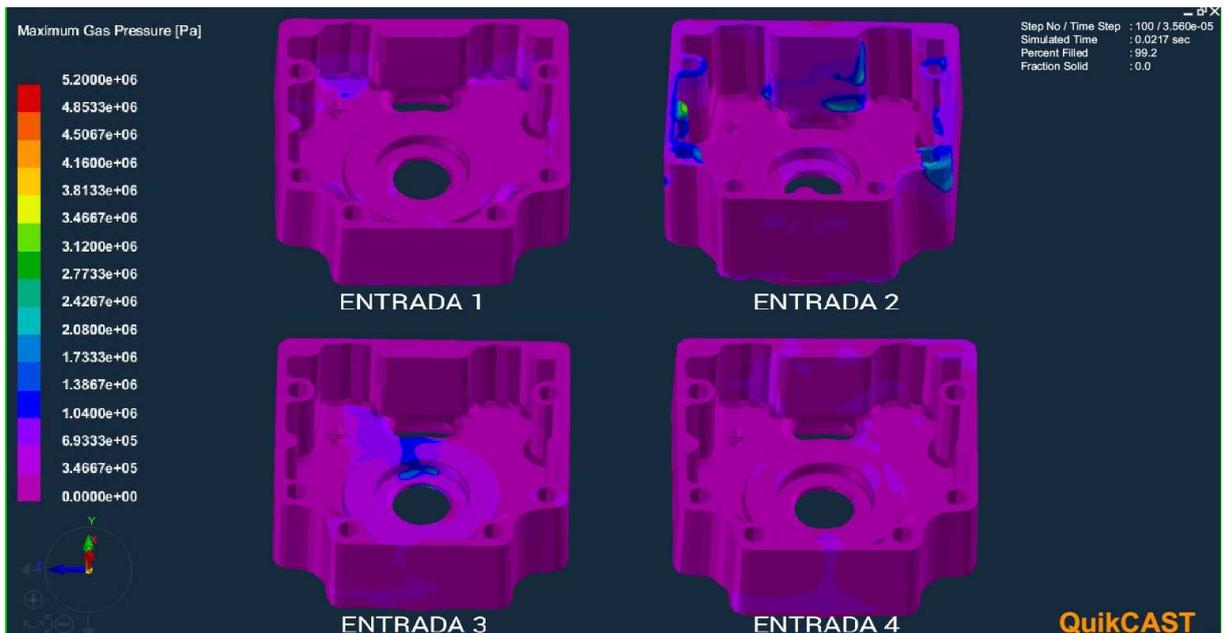
Pela análise das Figuras 23 e 24, verifica-se que nos métodos de entrada propostos 1 e 4 são os que apresentam menor pressão em seu interior, com o 4 levando ainda mais vantagem, pela análise os pontos com maior pressão seriam possíveis de colocação de saídas de ar para os dois métodos

Figura 23 - Análise da máxima pressão de gás 1



Fonte: Autor (2022)

Figura 24 - Análise da máxima pressão de gás 2



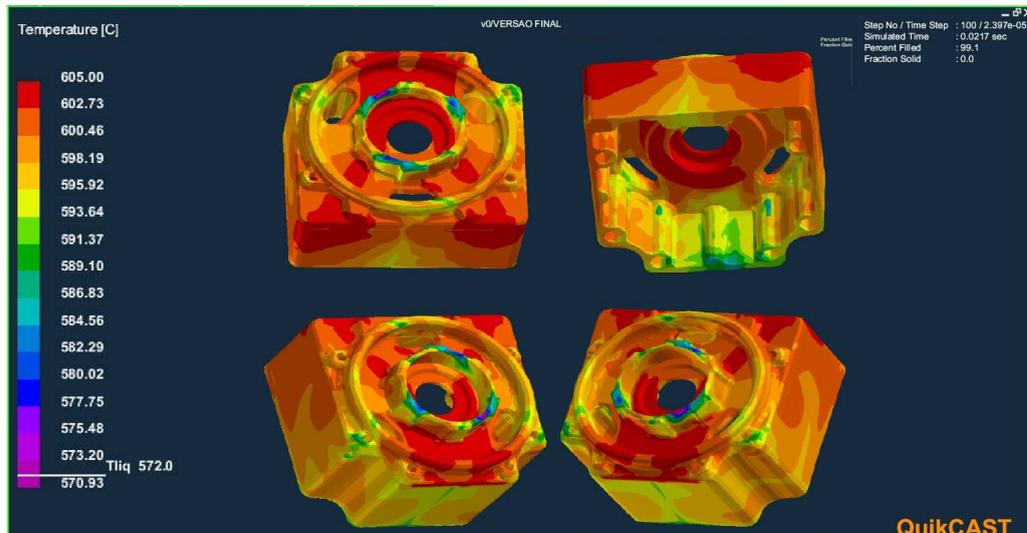
Fonte: Autor (2022)

Para os quatro métodos propostos de entrada, os tempos de enchimento e solidificação não obtiveram tantas diferenças, o enchimento ficou em torno de 0.02 s e a solidificação próximo a 6 s, não sendo parâmetros de corte para essa primeira análise.

Devido aos pontos apresentados anteriormente o método de entrada escolhido para continuar o projeto do molde foi o método 4, sendo assim o próximo passo foi a colocação dos pontos de saídas de ar para nova análise.

Com a nova simulação da peça, com os pontos de saída de ar, pode-se observar pela análise das temperaturas ao final do enchimento das Fig. 25, uma diferença de temperatura entre os pontos da peça de aproximadamente 30 °C, além disso não nota-se pontos em que o alumínio está abaixo da temperatura de solidificação durante o enchimento, estando dentro do esperado.

Figura 25 - Análise da temperatura simulação final

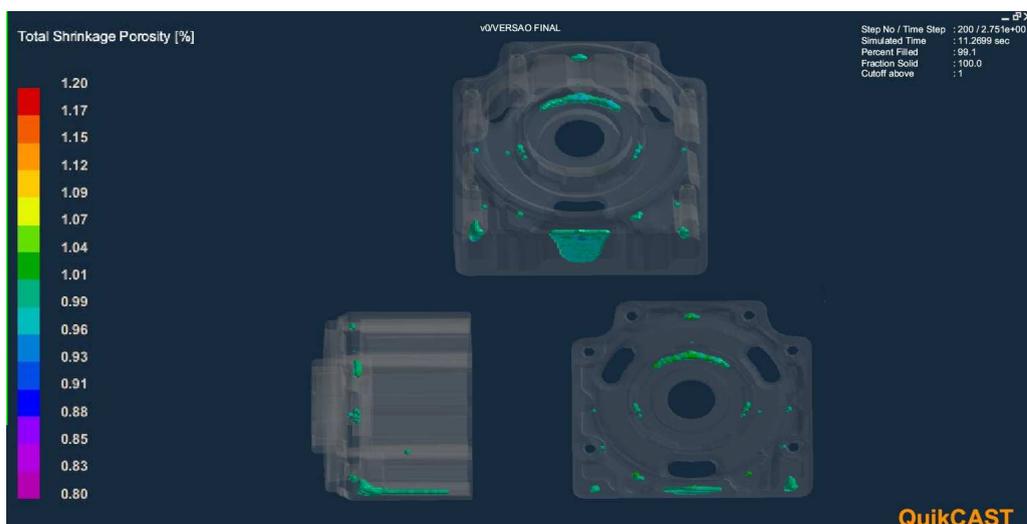


Fonte: Autor (2022)

Pela análise da porosidade apresentada na Fig. 26, observa-se que houve uma diminuição na porosidade após o incremento das saídas de ar, também é possível observar que nos pontos onde tem maior concentração de massa de alumínio, são onde ocorrem o maior percentual de porosidade.

Para essa peça em específico, a porosidade pode ser considerada aceitável por não estar concentrada no encaixe do eixo, permitindo usinagem no local, e além disso não ocorrer na face de vedação do servo motor, requisitos estes de projeto.

Figura 26 - Análise da porosidade simulação final

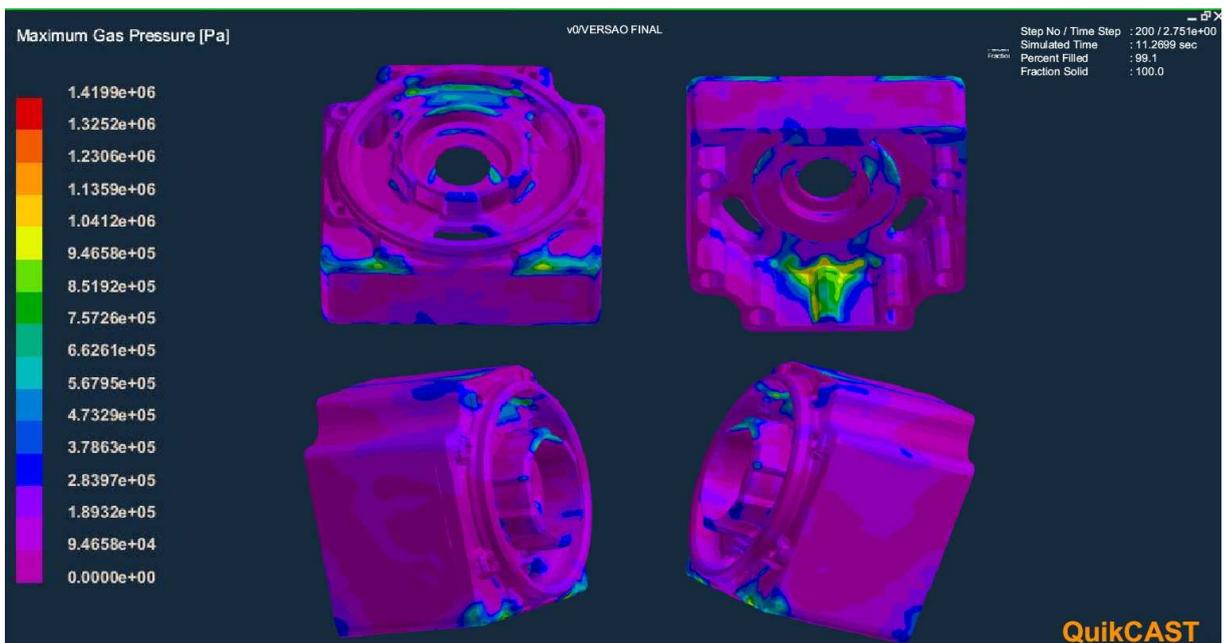


Fonte: Autor (2022)

Pode-se observar pela Fig. 27, que ao serem adicionadas as saídas de ar a pressão máxima do gás dentro da cavidade, que era de 1,3 MPa, caiu para a cada dos 0,9 MPa sendo considerada uma diminuição significativa na casa de 30%.

Segundo experiências em outros moldes, utilizados na mesma máquina, onde chega-se a ter pressões de gás na casa de 5 a 10 MPa, o valor de 0,9 MPa pode ser considerado aceito.

Figura 27 - Análise da máxima pressão de gás simulação final

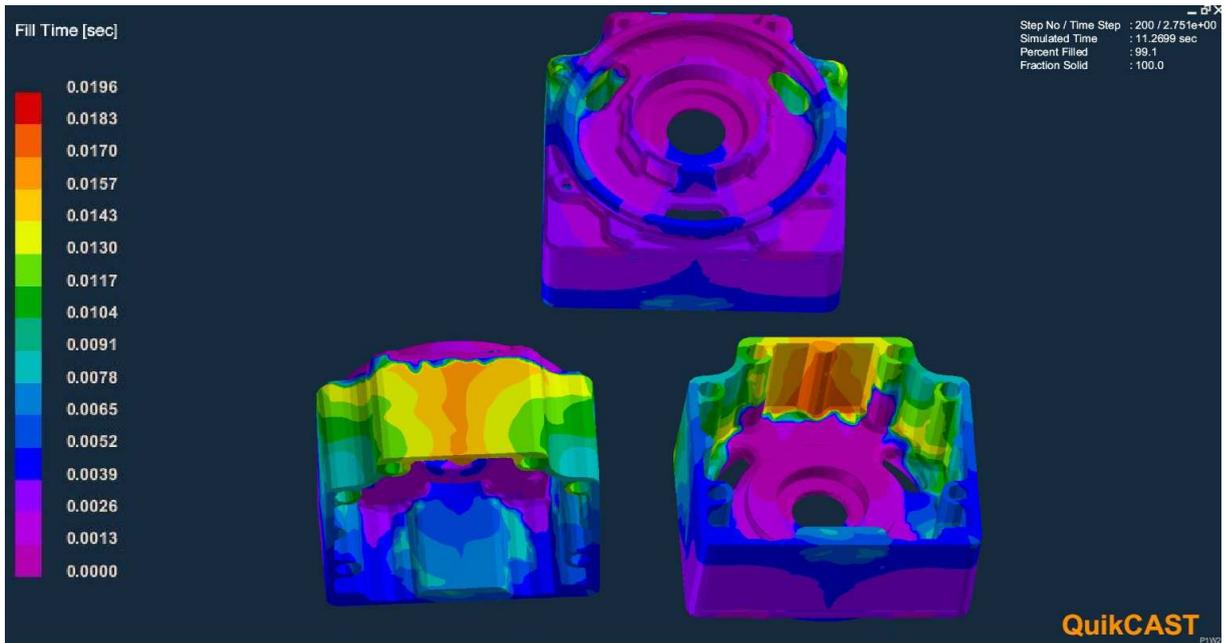


Fonte: Autor (2022)

Os tempos de enchimento e solidificação, Fig. 28 e 29, respectivamente, levando em consideração que a análise foi realizada somente para a cavidade da peça, são coesos com a realidade. Nota-se, também, que no canal de entrada da peça foi a última parte externa da peça a solidificar, por ser o último ponto a iniciar a perda de calor.

Observa-se que o enchimento ocorre por último na camada logo abaixo da entrada do material, sendo ponto de encontro de 3 fluxos dois de mesma temperatura e velocidade devido a simetria da peça, os quais originam das laterais da cavidade e um fluxo de entrada, o que poderia gerar um problema de solda fria, porém, em análise conjunta com a temperatura, elimina-se essa hipótese.

Figura 28 - Análise do tempo de enchimento simulação final



Fonte: Autor (2022)

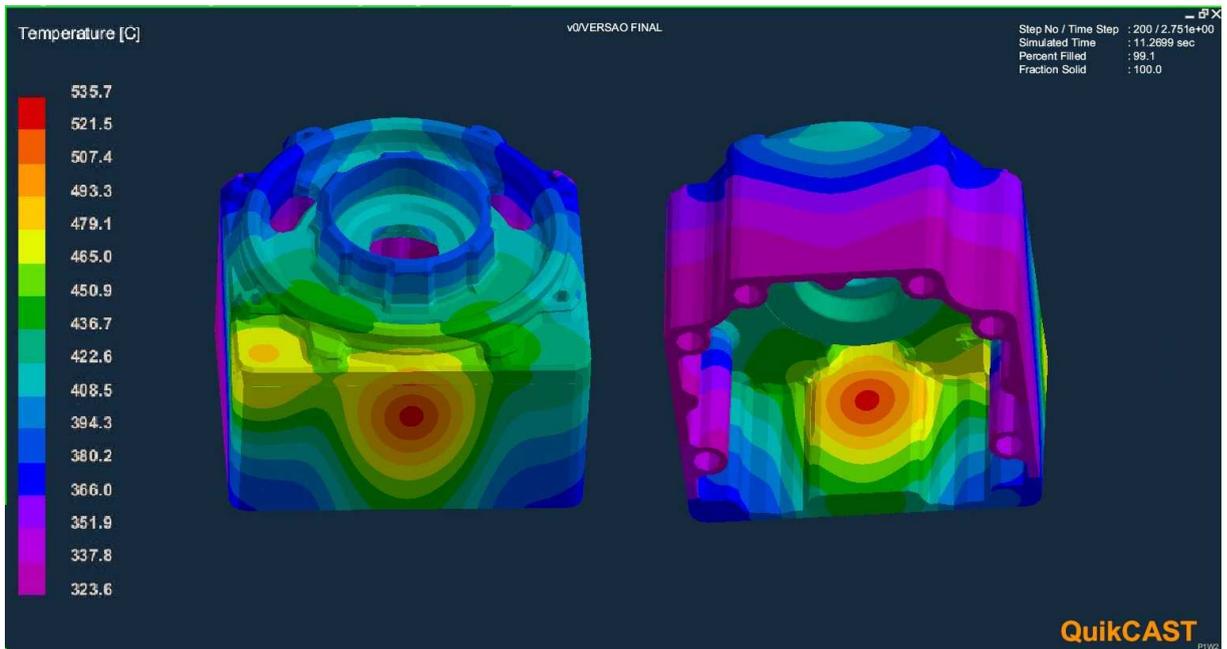
Figura 29 - Análise do tempo de solidificação simulação final



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 30, pode ser observado, mesmo após a solidificação, aos 11,3 s, uma concentração de calor na lateral inferior da peça, isso se deve ao fato de ocorrer uma maior espessura nesse ponto e um maior quantidade da liga.

Figura 30 - Análise da concentração da temperatura simulação final



Fonte: Autor (2022)

É necessária uma nova simulação inserindo os canais de refrigeração no molde, tomando como base inicial o local demonstrado, pois essa diferença de temperatura é prejudicial ao molde, o qual, neste ponto, irá trabalhar sempre em alta temperatura, reduzindo sua vida útil.

6. CONCLUSÃO

Pela análise dos métodos de entrada foi verificado que a peça é possível de ser fabricada. Dentre os métodos, o 4 foi o escolhido levando em consideração, o correto enchimento da peça, sem formação de juntas frias, menor porosidade, menor pressão de gás na cavidade e pontos necessários de saída de ar em locais possíveis.

Com a colocação das saídas de ar, e a nova simulação, observou-se que não ocorreram soldas frias, em relação à porosidade, notou-se uma diminuição. Obteve-se uma pressão máxima de ar 0,9 MPa, tempo de enchimento e solidificação, sendo estes somente da cavidade, 0,02 s e 6 s respectivamente, dados estes que foram considerados aceitos.

Pela análise da simulação da temperatura após 11,3 segundos notou-se um ponto de calor excessivo no molde, o qual no projeto do molde, deve ser considerado para realização dos canais de refrigeração, os quais não foram colocados na simulação, pelo software não permitir colocação de refrigeração com o molde implícito, fugindo assim do propósito do trabalho de análise preliminar ao projeto do molde.

Para estudos futuros indica-se a realização do projeto do molde com os canais de injeção, refrigeração, bolsas e saídas de ar, tomando como base as análises das simulações realizadas e após novamente realizar a simulação e análise do mesmo.

REFERÊNCIAS

- ABAL. **APLICAÇÕES DO ALUMÍNIO: AUTOMOTIVO E TRANSPORTES**. 2021 (a). Disponível em: <http://abal.org.br/aplicacoes/automotivo-e-transportes/automoveis/#accordion2>
Acesso em: 28 de Novembro de 2021.
- ABAL. **Produção de Produtos Transformados de Alumínio**. 2021 (b). Disponível em: <https://abal.org.br/estatisticas/nacionais/transformados/producao/> Acesso em: 12 de Fevereiro de 2022.
- ARIETA, F. **Mecanismos de desgaste em ferramentas de injeção sob pressão de ligas de alumínio**. Projeto FUNDEP - ROTA 2030, Junho de 2021.
- ASSUNÇÃO JUNIOR, M. L. **Análise dos mecanismos de falha que influenciam a redução da vida útil do inserto do postigo central do ferramental de injeção de alumínio HPDC High Pressure Die Casting**. Belo Horizonte, abril de 2015.
- BREVICK, J., **Die casting porosity guidebook**, Wheeling: North American Die Casting Association, 2009.
- CARDINALI, A., TOLEDO, E. F., 2011. **A influência do teor de alumínio em injetados sob pressão nas ligas de zinco**. SENAI, Osasco, dezembro de 2011.
- FALAVIGNA, D. **Análise da influência do uso de lubrificantes na qualidade superficial de peças de alumínio torneadas**. Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.
- Garside, M., **Global refined aluminum consumption, by region 2015-2020**, statista, outubro de 2021.
- GASPAR, Š.; CORANIČ, T.; MAJERNÍK, J.; HUSÁR, J.; KNAPČÍKOVÁ, L.; GOJDAN, D.; PASKO, J. **Influence of Gating System Parameters of Die-Cast Molds on Properties of Al-Si Castings**. *Materials* 2021, 14, 3755.

GONÇALVES, C. S.. **Efeito do processo de nitretação sob plasma no comportamento em fadiga térmica dos aços ferramenta para moldes para injeção de alumínio sob pressão**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

HONG, K. K.; KWANG, K. S. “CAE simulation of HPDC Process with Automobile part (Oil Pan)”, **International Journal of Digital Content Technology and its Applications(JDCTA)** Volume7, Number13, Sep 2013.

IAL, Internacional Aluminium org, **“Assessment of Aluminium Usage in China’s Automobile Industry 2016~2030”**
<<https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2019/02/Report.pdf> >

MALAVAZI, J. **Área de fundição: Processo de fundição sob pressão**. Osasco: SENAI, 2005.

MITTERER, C. **Application of hard coatings in aluminium die casting – soldering, erosion and thermal fatigue behaviour**, *Surface and Coatings Technology* 125, p.233-239, 2000.

MITTERER, C. Industrial applications of PACVD hard coatings, **Surface and Coatings Technology** 163-164 p. 716-722, 2003.

Mordor, Mordor Intelligence, **Mercado de fundição de alta pressão - crescimento, tendências, impacto covid-19 e previsões(2022-2027)**. 2022.
<<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/high-pressure-die-casting-market>>

NADCA. **Business Solutions Based on NADCA Research. DIE MATERIALS & TECHNOLOGIES**. Wheeling, IL: NADCA, 2009.

REBELLO, M.A. **O Uso de Análise via CAE na Fundição sob Pressão de Ligas de Alumínio**, Dissertação de Mestrado, 2000.

ROSSO, M.; LOMBARDO, S.. Analisi dei vantaggi derivanti dal controllo termico dello stampo nella pressocolata. **La Metallurgia Italiana**, Milano, v. 5, p. 15-24, maio 2017.

SILVEIRA, C. B. **Servo Motor: Veja como Funciona e Quais os Tipos**. Citisystems, 2016.

TSENG, C.H.E.; ASKELAND, D.R. **Study of the EPC Mold Filling Process Using metal Velocity and Mass and Energy Balances**. AFS Transactions, 100:520- 529. 1992

VENDRAMIM, J.C.; ENOKIBARA, F. Considerações sobre a vida útil de moldes para fundição de alumínio sob pressão. **Revista Ferramental 2020**, Joinville, Set. 2020.

VERRAN, G. O.; MENDES, R. P. K.; ROSSI, M. A. **Avaliação da influência dos parâmetros de injeção sobre a formação de defeitos em peças injetadas em ligas de alumínio: resultados experimentais vs. simulação numérica**. In: Congresso brasileiro de engenharia de fabricação, 2005, Joinville.

VERRAN, G. O.; MENDES, R. P. K. 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. 2006.

VIANA, D.; FARIA NETO, A. **Otimização do processo de fundição sob pressão aplicando o método de Taguchi**. Revista Produção Online. 13. 1435. 10.14488/1676-1901.v13i4.1431.

WANNARUMON, S.; GRANDE, M. A. **Comparisons of Computer Fluid Dynamic Software Programs applied to Jewelry Investment Casting Process**. Alessandria, Italy, 2009.

ZITAI. **Zitai Precision Machinery CO., LTD.**
<<https://www.zitai.com/pt/product-506999/2500T-Injetoras-de-Aluminio-Camara-Fria-de-Alta-Press%C3%A3o-ZDC-2500TCM.html> >