

JOÃO GUILHERME DE OLIVEIRA MAINENTI

Análise da Porosidade de Peças Fundidas por
Modelagem Matemática – Estudo de Caso

São Paulo

2020

JOÃO GUILHERME DE OLIVEIRA MAINENTI

Análise da Porosidade de Peças Fundidas por
Modelagem Matemática – Estudo de Caso

Trabalho de Formatura
apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção de
título de Engenheiro de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de
Aquino Martorano

São Paulo

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação-na-Publicação

Mainenti, João Guilherme

Análise da Porosidade de Peças Fundidas por Modelagem Matemática –
Estudo de Caso / J. G. Mainenti -- São Paulo, 2020.

69 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Fundição 2.Porosidade 3.Simulação I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família,
por me darem todo amor e suporte necessários sempre.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Dr. Marcelo de Aquino Martorano, por me ajudar na criação e no desenvolvimento deste trabalho, estando sempre presente.

À empresa ESI Group, em especial ao Rodrigo Mitsuo Morishita, por todos os ensinamentos com relação ao software e na vida profissional, pelo incentivo a fazer este trabalho e pelo suporte no seu desenvolvimento.

À indústria Vlados, em especial ao Fernando, por tornar este trabalho possível.

À todos os professores da Escola Politécnica da USP, especialmente aos professores do Departamento de Materiais e Metalurgia, com os quais tive o imenso prazer de aprender grande parte do meu conhecimento pela Engenharia.

Aos meus amigos Leonardo, Camila, Bianca, Rodrigo, Victor e Jéssica, por fazerem os anos de Poli serem mais leves, divertidos e descontraídos.

Aos meus irmãos Victor, Beatriz e Fernanda, por sempre estarem ao meu lado nos momentos bons e ruins, e por serem os pilares na minha vida.

Aos meus pais Thais e João, pelo apoio em todas as minhas decisões, os ensinamentos de vida que só me fazem crescer e por serem as minhas inspirações diárias.

E, à Deus, pelas tantas oportunidades que me foram concedidas e por tornar tudo o que sou e tenho hoje possível.

Resumo

Fundição é um processo de fabricação que vem crescendo muito e se tornando cada vez mais importante para as indústrias. Juntamente, as simulações também vêm avançando neste campo para se evitar que defeitos continuem a aparecer nos fundidos. Os objetivos principais deste trabalho são analisar e investigar, através de um software, a eficácia da simulação de fundição para a redução de porosidades em uma peça fundida. A peça em questão deste estudo de caso foi fundida de duas formas diferentes na indústria Vlados, localizada na cidade de São Paulo, e simulada através do software QuikCAST (versão 14.5), desenvolvido pela empresa ESI Group, de três maneiras distintas. A eficácia do software foi comprovada, apresentando resultados das porosidades, para os dois casos fundidos na prática, semelhantes aos vistos na indústria. Além disso, uma simulação extra, com o intuito de se obter resultados mais favoráveis, apresentou um aumento no número e tamanho das porosidades quando se comparado com as outras duas situações.

Palavras-Chave: Fundição; Porosidade; Simulação.

Abstract

Foundry is a manufacturing process that has been growing and becoming increasingly important for industry. Simulations are also advancing in this field to prevent defects in castings. The main objectives of this work are to analyze and investigate, through a software, the effectiveness of the casting simulation and possible improvements for the reduction of porosities in a casting part. The cast part in this study was cast in two different ways at the Vlados company, located in the city of São Paulo, and simulated with the QuikCAST software (version 14.5), developed by the ESI Group, in three different ways. Two of them were simulated with the software and cast, whereas the third was only simulated. The effectiveness of the software was confirmed, showing porosity results very similar to those observed in two cases that were also cast. In addition, the extra simulation, in order to obtain more favorable results, showed an increase in number and size of porosities when compared to the other two situations.

Key Words: Foundry; Porosity; Simulation

Lista de Figuras

Figura 1 – Representação de estruturas cristalinas de metais. (Fonte: https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/ligacoes-metalicas-as-propriedades-dos-metais.htm).....	18
Figura 2 – Exemplos de porosidades formadas em uma peça de alumínio fundido. (a) Representação de macroporosidades; (b) Representação de microporosidades. (Fonte: https://docplayer.com.br/52532103-Defeitos-de-fundicao-areia-verde-rscp-labats-demec-ufpr-2017.html)	19
Figura 3 – Representações das compensações à contração do metal. (a) Compensação apenas pela porosidade; (b) Compensação tanto por porosidade quanto por rechuve das bordas; (c) Compensação apenas por rechuve das bordas. [14]	20
Figura 4 – Gráfico da quantidade de porosidades pela quantidade de gás hidrogênio dissolvido no metal. [16]	22
Figura 5 – (a) Porosidade devido a gases dissolvidos; (b) Porosidade devido ao mecanismo de contração do metal. [15].....	23
Figura 6 – Gráfico mostrando a influência do tamanho dos poros nos ciclos de fadiga do metal. [16].....	24
Figura 7 – Tabela relacionando a ductilidade do metal com o volume das porosidades para quatro diferentes ligas. [21].....	24
Figura 8 – Gráfico relacionando a fração de poros com a taxa de resfriamento do metal. [15].....	26
Figura 9 – Gráfico relacionando a quantidade de porosidades e contrações do metal com o tamanho do massalote. [14].....	26
Figura 10 – Comparações de medidas na prática com a simulação. (a) Temperatura do metal pelo tempo; (b) Temperatura do molde pelo tempo; (c) Taxa de resfriamento do metal pela temperatura. [7].....	30
Figura 11 – Exemplo de geometria CAD a ser inserida no software (a imagem maior representa a geometria da peça a ser fundida fora do molde; já a imagem	

menor dentro do quadrinho representa a geometria cortada da peça a ser fundida dentro do molde). [24]	31
Figura 12 – Exemplo da confecção de malhas geométricas 2D. (a) Representa uma malha mais grossa; (b) Representa uma malha mais fina. [7].....	32
Figura 13 – Exemplo do resultado de fração líquida da peça ao longo do tempo de solidificação. (a) Peça sem resfriador após 700s; (b) Peça com resfriador após 100s; (c) Peça com resfriador após 30s. [29]	32
Figura 14 – Exemplo de três resultados distintos (fração sólida, pressão total e porosidade) em função do tempo de solidificação. [7]	33
Figura 15 – Exemplo de um fluxograma do passo a passo de uma simulação no ProCAST. [31]	34
Figura 16 – Diagrama de fases Al-Si. [ASM-HANDBOOK, 10th ed., v. 3, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1992].....	39
Figura 17 –Válvula produzida na fundição Vlados após usinagem: peça (a) em pé e (b) deitada. (Fonte: fundição Vlados)	40
Figura 18 – Representação da peça com contendo canais (canais de ataque circulados em amarelo), massalotes (circulados de vermelho) e saídas de ar (circuladas de preto). (Fonte: software QuikCAST)	41
Figura 19 – Desenho da peça contendo massalotes e canais de enchimento (a) sem masslote lateral; (b) com o massalote lateral. (Fonte: software QuikCAST)	42
Figura 20 – Geometria CAD de todas as partes (moldes em cinza e verde, macho em rosa, e cavidades em azul). (Fonte: software QuikCAST).....	44
Figura 21 – Representação da malha 2D (STL) gerada através do CAD das cavidades. (Fonte: software QuikCAST)	45
Figura 22 – Modelo da malha 3D da peça, representada por vários cubos com que a mesma é formada. (Fonte: software QuikCAST).....	46
Figura 23 – Representação da ciclagem térmica realizada no ferramental: do lado esquerdo tem-se um ponto escolhido na coquilha fixa, e do lado direito um gráfico de temperatura por tempo demonstrando o alcance do regime estacionário de	

aquecimento-resfriamento de trabalho deste ferramental. [Software QuikCAST]	48
Figura 24 – (a) Espessura dos ataques para as simulações da peça que já foram feitas na prática; (b) Espessura dos ataques para a simulação extra realizada. (Fonte: software QuikCAST)	49
Figura 25 - Representação da região do bocal da peça. (Fonte: software QuikCAST)	51
Figura 26 – (a) e (b) Rechupes localizados na parte do bocal da válvula. (Fonte: fundição Vlados)	51
Figura 27 – Isolamento de massa líquida na região do bocal da peça: (a) com uma vista da direita e (b) com uma vista da esquerda; Previsões de porosidades nesta mesma região do bocal: (c) com uma vista da direita; (d) com uma vista da esquerda. (Fonte: software QuikCAST)	52
Figura 28 – Representação da localização do pino interno da peça. (Fonte: software QuikCAST)	53
Figura 29 – (a) e (b) Porosidades na região próxima ao pino interno da peça. (Fonte: fundição Vlados)	53
Figura 30 – (a) Isolamento de massa líquida na região do pino interno, quando não se tem o massalote lateral; (b) Previsão de porosidade nesta mesma região, sem o massalote lateral. (Fonte: software QuikCAST)	54
Figura 31 – Representação da localização das costas da peça próxima a um dos ataques. (Fonte: software QuikCAST)	55
Figura 32 – Presença de rechupe próximo ao ataque inferior da peça. (Fonte: fundição Vlados)	55
Figura 33 – (a) Isolamento de massa líquida nas costas da válvula entre os dois ataques indentificados na figura; (b) Previsão de porosidades nesta mesma região. (Fonte: software QuikCAST)	56
Figura 34 – (a) Isolamento de massa líquida em uma das hastes da parte superior da peça; (b) Previsão de porosidade nesta mesma região. (Fonte: software QuikCAST)	57

Figura 35 – Representação da região externa do pino, na interface peça/massalote lateral. (Fonte: software QuikCAST).....	59
Figura 36 – Porosidade por contração na região da peça já usinada na interface peça/massalote lateral. (Fonte: fundição Vlados).....	60
Figura 37 – (a) Isolamento de massa líquida na região do pino interno com o massalote lateral; (b) Previsão de porosidade nesta mesma região com o massalote lateral; (c) Previsão de porosidade na região da válvula mais próxima do massalote, representada por um corte na interface peça/massalote (neste caso, a porosidade está sendo representado pelas cores diferentes da roxa). (Fonte: software QuikCAST)	61
Figura 38 – Previsão de porosidades nas costas da válvula entre os dois ataques indentificados na figura: (a) nos dois primeiros casos de simulação e, (b) para a simulação extra, com os ataques mais largos. (Fonte: software QuikCAST) ...	63

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Densidade da liga em função da sua temperatura. [Software QuikCAST]	37
Gráfico 2 – Fração sólida da liga em função da sua temperatura. [Software QuikCAST]	38

Lista de Abreviações

A.C. – Antes de Cristo

IACS – International Annealed Copper Standard

HB – dureza Brinell (“Hardness Brinell”)

Lista de Símbolos

M – metal

H₂O – água

MO – óxido metálico

H₂ – gás hidrogênio

Al – Alumínio

Si – Silício

Fe – Ferro

Cu – Cobre

Mn – Manganês

Mg – Magnésio

Ni – Níquel

Zn – Zinco

Sn – Estrôncio

C – Carbono

S – Enxofre

s – segundo

g – grama

kg – kilograma

mm - milímetro

mm² - milímetro quadrado

cm³ - centímetro cúbico

m² - metro quadrado

°C – graus Celsius

% - porcentagem

GHz – gigahertz

GB – gigabyte

K – Kelvin

W – watt

t – tempo

T – temperatura

∂ - del

$\frac{\partial}{\partial}$ - derivada parcial

div – divergente

ρ_s – massa específica do sólido

g_s – volume de fração sólida

ρ_l – densidade do líquido

g_l – volume de fração líquida

g_p – volume de fração de poros

v_l – velocidade do líquido

K – permeabilidade do sólido

μ - viscosidade dinâmica do líquido

p_l – pressão local no líquido

g – gravidade

h_{eq} – coeficiente de troca térmica equivalente

d_i – distância do nó do material “ i ” até a interface com outro material

λ_i – condutividade do material “ i ”

Sumário

1. Introdução	15
2. Objetivo.....	16
3. Revisão Bibliográfica	17
3.1. Solidificação de Metais	17
3.1.1. Metais Líquidos.....	17
3.1.2. Solidificação	17
3.2. Porosidade.....	19
3.2.1. Formação das porosidades	20
3.2.2. Problemas relacionados a porosidades	23
3.2.3. Possíveis soluções das porosidades.....	25
3.3. Modelagem Matemática	27
3.3.1. Modelagem Matemática relacionado à porosidade	27
3.3.2. Simulação	29
3.3.3. Funcionamento da Simulação	31
3.3.4. ProCAST/QuikCAST	33
4. Materiais e Métodos.....	36
4.1. Fundição real da peça	36
4.1.1. Materiais utilizados.....	36
4.1.2. Método empregado	39
4.2. Simulação da Fundição	42
4.2.1. Metodologia do software	44
5. Resultados e Discussão	50
5.1. Fundição sem o massalote lateral.....	50
5.2. Fundição com o massalote lateral	59
5.3. Simulação com os ataques mais espessos	62
6. Conclusão	65
7. Referências Bibliográficas.....	66

1. Introdução

A fundição de metais é conhecida há diversos milênios pela humanidade. O manuseio de metais e a sua fundição começaram no período Calcolítico, ou Idade do Cobre, por volta de 5000 a 4000 A.C. [1,2] Desde então, esta técnica de fundir os metais e suas ligas, colocá-los em moldes e dar-lhes uma certa forma vêm sendo cada vez mais utilizada e se tornando mais importante para diferentes segmentos da indústria, por exemplo, na indústria automotiva, naval, de construção civil, ferroviária, de mineração, hospitalar, alimentícia, de energia, entre tantas outras. [3]

Devido às suas altas demandas de utilização e importância, com o passar dos anos, as fundições foram aprimorando os seus métodos, acompanhando o avanço tecnológico e automatizando-se alguns processos, para que então, se tenham cada vez menos defeitos em suas produções. [4] Entretanto, ainda assim, devido à complexidade dos fenômenos pertinentes à solidificação dos metais, defeitos como porosidades são encontrados e muitas vezes complicados de serem eliminados. [5]

Atualmente, por meio da modelagem matemática, de cálculos e equações, juntamente com algoritmos e programações computacionais, tem-se a utilização das simulações em três dimensões (3D), que através de um software possibilita realizar e visualizar facilmente a previsão de certos defeitos, acompanhar o que pode acontecer com tal fundição antes mesmo que ela ocorra. Essa ferramenta previne então o desperdício de material pela fundição, altos tempos de produção e planejamento e permite a realização de testes práticos. Consequentemente, tem-se um aumento na capacidade produtiva e menos gastos e despesas por parte da indústria. [5 – 7]

2. Objetivo

Este trabalho, sendo um estudo de caso, tem como objetivo geral demonstrar a eficácia dos softwares de simulação para fundição e um objetivo específico de investigar possíveis melhorias para a redução de porosidades em uma peça fundida na liga de alumínio SAE-323 através da fundição por gravidade em coquilha. Nesse estudo utilizou-se como ferramenta o software QuikCAST (versão 14.5) desenvolvido pela empresa ESI Group.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Solidificação de Metais

3.1.1. Metais Líquidos

Metais quando estão em sua forma líquida raramente se apresentam totalmente puros. Normalmente, contêm em sua estrutura algumas impurezas, inclusões, alguma contaminação presente em seu meio. Estas alterações no metal líquido podem fazer com que apareçam no mesmo, ao se solidificar, diversos tipos de defeitos, como porosidades e trincas, que causam uma diminuição das propriedades mecânicas do material. [8]

Outro fato importante dos metais líquidos é a sua alta reatividade química e interação quando se encontram neste estado físico, reagindo facilmente com o ambiente em que está presente (cadinho, forno etc.) e com o oxigênio e a umidade do ar também, oxidando o metal e liberando gás hidrogênio, como a reação (1) abaixo, sendo esta apenas uma das possíveis reações que podem ocorrer.



Sendo a alta reatividade do metal líquido então, mais um provável causador de problemas e defeitos durante a sua solidificação. [8]

3.1.2. Solidificação

A solidificação nada mais é do que uma transformação física, no qual o material passa do seu estado líquido para o seu estado sólido. Fazendo com que os átomos passem de uma disposição semidesorientada no estado líquido, para uma melhor orientação e distribuição dos átomos no estado sólido, apresentando assim uma estrutura chamada de cristalina. No caso dos metais, as células unitárias, escolhidas para representar a simetria e a organização da estrutura

cristalina, mais comuns são: a cúbica de face centrada (CFC), cúbica de corpo centrado (CCC) e hexagonal compacta (HC) (Figura 1). [9]

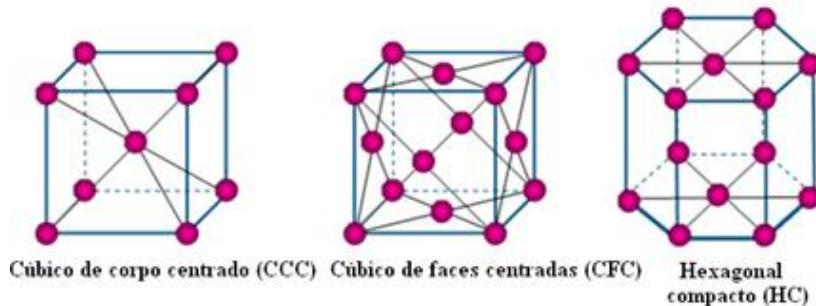


Figura 1 – Representação de estruturas cristalinas de metais. (Fonte: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/ligacoes-metalicas-as-propriedades-dos-metais.htm>)

A nucleação é o primeiro passo para ocorrer a solidificação de um metal. Acontece quando o metal atinge uma certa temperatura abaixo da temperatura de solidificação, fazendo com que os átomos lentamente unam-se uns aos outros formando núcleos sólidos no meio do líquido. [10] Os próximos passos seriam o crescimento desses núcleos, a formação dos cristais e assim, por último, a estruturação cristalina do sólido. [11]

Entretanto, como já dito anteriormente, o metal líquido não se encontra totalmente puro, e isso influenciará em sua solidificação, sendo esta não tão fácil como explicado acima, não apresentando uma estrutura cristalina perfeita. Assim, quando o metal se solidificar, ele não apresentará apenas uma fase, mas as impurezas e contaminações criarão também outras fases com estruturas diferentes da apresentada pelo metal, modificando a estrutura geral e podendo causar defeitos e problemas no sólido. [9]

Há diversos tipos de imperfeições que podem ser criadas e reproduzidas durante a solidificação do metal:

- Defeitos pontuais, como lacunas e intersticiais;
- Defeitos lineares, como discordâncias em cunha, em hélice e mista;
- Defeitos superficiais, como contornos de grão, tamanho de grão, contornos de fase e defeitos de empilhamento;

- Defeitos tridimensionais, como partículas de segunda fase (precipitados e inclusões), gases dissolvidos e poros (macro e microporosidades). [12]

Dos defeitos citados acima, a porosidade nos metais, tanto macro como micro, será o foco dos estudos e será mais bem detalhada a seguir.

3.2. Porosidade

As porosidades são uns dos principais problemas enfrentados nas indústrias de fundição. Nada mais são do que aglomerados de vazios em formatos esféricos no meio do metal solidificado (Figura 2). [13]

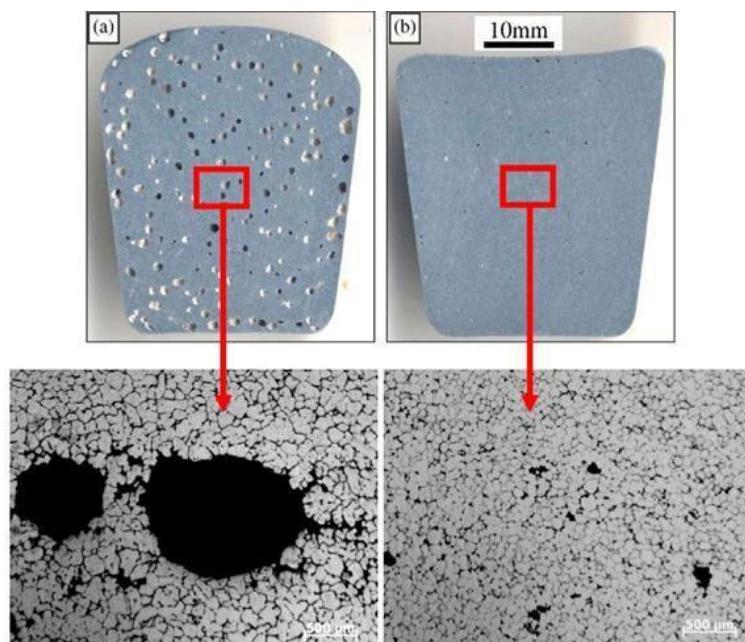


Figura 2 – Exemplos de porosidades formadas em uma peça de alumínio fundido. (a) Representação de macroporosidades; (b) Representação de microporosidades. (Fonte: <https://docplayer.com.br/52532103-Defeitos-de-fundicao-areia-verde-rscp-labats-demec-ufpr-2017.html>)

3.2.1. Formação das porosidades

Há diversos tipos de porosidades e diferentes maneiras de se obtê-las. Estas porosidades são divididas normalmente entre macroporosidades e microporosidades, e as duas maneiras mais comuns de as formar são: devido à contração do metal durante sua solidificação e a gases dissolvidos.

Durante a solidificação do metal, ele tende a se contrair devido ao rearranjo dos átomos de sua estrutura líquida, que estão mais dispersos, para a sua estrutura sólida cristalina mais densa e compacta. Para os metais que apresentam uma estrutura cristalina hexagonal compacta e cúbica de face centrada apresentam contrações de, aproximadamente, 3.2 – 7.2%, enquanto para os de estrutura cúbica de corpo centrado apresentam uma contração por volta de 2 – 3.2%. [14] Quando a contração do sólido começa então a ocorrer, para que as duas fases continuem em equilíbrio, a parte líquida deveria compensar essa contração da parte sólida expandindo-se. Mas isto não ocorre, o que realmente acontece, é a geração de uma grande pressão negativa no metal ao se transformar em sólido que é compensada por rechupes nas bordas das peças e/ou criações de vazios no meio do metal, as porosidades (Figura 3). [15] Há um caso específico, do ferro fundido, em que as contrações do fundido são compensadas pelo grafite contido nesse metal, essa compensação é chamada de expansão grafítica, em que, na maioria dos casos de peças que se utilizam desse material, não há problemas de porosidades devido à contração do mesmo. [14]

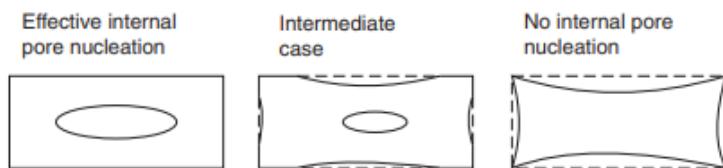


Figura 3 – Representações das compensações à contração do metal. (a) Compensação apenas pela porosidade; (b) Compensação tanto por porosidade quanto por rechupe das bordas; (c) Compensação apenas por rechupe das bordas. [14]

Ainda durante as contrações, o fato de haver segunda fase, impurezas e inclusões no metal líquido, aumentam-se as chances de esses serem pontos críticos, pois bloqueiam o fluxo do líquido em direção ao lugar em que está ocorrendo a contração do metal, mas também por serem pontos de nucleação de poros quando o metal se torna sólido, aumentando as chances de formação de porosidades nestes locais e no meio da peça. [16]

A outra maneira bastante comum de se obter poros em uma peça metálica fundida é através da dissolução de gases no metal líquido. A solubilidade dos gases no metal líquido diminui conforme a temperatura também diminui. Se a quantidade de gases for maior do que a solubilidade limite do metal enquanto ele ainda está em sua fase líquida e não começou o seu processo de solidificação, não haverá problema, pois os gases em excesso ainda conseguirão ir para a superfície e sair do meio em que estão. Porém, quando se inicia a solidificação do metal, como a solubilidade dos gases no sólido é menor, ocorre uma rejeição desses elementos para o líquido. Então, em certo instante, atinge-se o limite de solubilidade na parte líquida e precipitam-se bolhas. Devido à presença de uma estrutura dendrítica nos metais, estas bolhas apresentam dificuldade para se movimentar e sair, ficando presas no meio do metal e gerando assim porosidades. [5, 17, 18]

Os gases são dissolvidos no metal líquido, normalmente, quando este é vazado no molde, devido ao ar que já se encontra dentro das cavidades e, dependendo do caso, se o metal é vazado com uma alta velocidade ou por um canal de descida muito alto, há aspirações de ar, que além de dissolverem gás também podem oxidar o metal. [14]

Pode-se fazer uma relação ainda entre a quantidade de gás dissolvido (gás hidrogênio) e a quantidade de poros gerados na peça (Figura 4), mostrando que quanto mais gás dissolvido maior a quantidade de porosidade no metal, confirmado que os gases dissolvidos geram porosidades. [16]

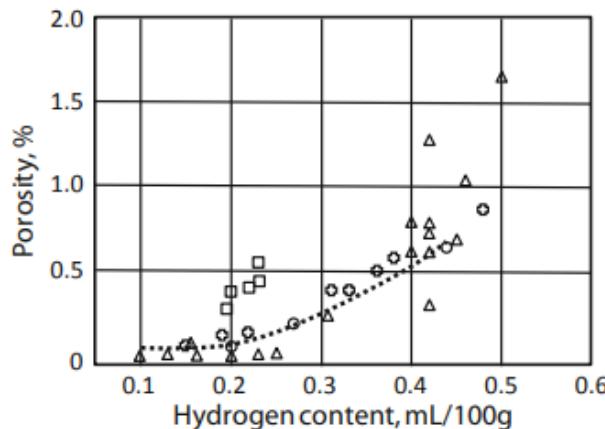


Figura 4 – Gráfico da quantidade de porosidades pela quantidade de gás hidrogênio dissolvido no metal.
[16]

O gás que mais traz problemas para as fundições que utilizam alumínio, por ser difícil de retirar, o mais comum e o que produz mais porosidades nas peças, é o gás hidrogênio. [14] Já em outras fundições que utilizam outras ligas, como de cobre ou de ferro, outros gases também podem ser problemáticos para o metal, causando defeitos, por exemplo, o gás oxigênio e o gás nitrogênio.

Um fato importante sobre as porosidades é que dependendo do seu tamanho e do seu formato, é possível saber qual foi o mecanismo de formação daquele poro. No caso da porosidade devida à contração do metal, os poros formados normalmente são bem menores (microporosidades) e são disformes, não apresentam um padrão em sua forma, enquanto que os poros gerados pela dissolução dos gases são maiores (macroporosidades) e são caracterizados por terem uma configuração esférica (Figura 5). [15]

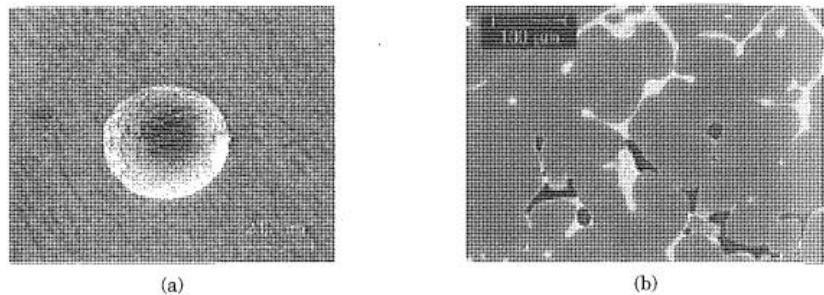


Figura 5 – (a) Porosidade devido a gases dissolvidos; (b) Porosidade devido ao mecanismo de contração do metal. [15]

3.2.2. Problemas relacionados a porosidades

O grande problema das porosidades são as consequências trazidas por ela, pois elas afetam diretamente a performance do metal e as suas propriedades mecânicas, como a ductilidade e a fadiga, fragilizando a peça.

No caso da fadiga do material, as porosidades apresentam um efeito significante. Assim sendo, quanto maior for a porosidade e a quantidade de porosidades na peça metálica, menor será o número de ciclos em que este metal suportará até romper, como demonstrado na Figura 6, a seguir. Isto ocorre devido aos poros agirem como nucleadores da trinca pela fadiga, fazendo com que as trincas aconteçam antes do previsto quando comparadas com peças sem a presença de porosidades. [19, 20]

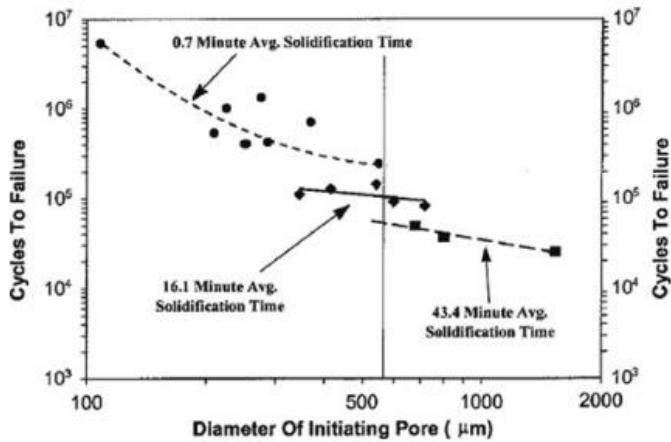


Figura 6 – Gráfico mostrando a influência do tamanho dos poros nos ciclos de fadiga do metal. [16]

Esta queda nas características também acontece para as propriedades elásticas do material, por exemplo, o alongamento dos metais até que ocorra uma fratura, o qual diminui muito quando se aumenta a quantidade de poros, fazendo com que a peça seja quebrada antes do seu tempo natural se não houvessem porosidades (Figura 7). E, isto ocorre pelo mesmo motivo anterior, devido ao fato de as fraturas serem mais propícias a iniciarem e se propagarem próximas dos poros. [21]

Alloy	Distance from Chill (mm)	EL Pct	Porosity (Vol Pct)
H1	5	4.5 ± 0.5	0.014
	20	1.7 ± 0.16	0.024
	40	1.1 ± 0.3	0.212
	100	0.41	0.505
H1T	5	4.5 ± 0.9	0.029
	20	2.5 ± 1.0	0.115
	40	1.1 ± 0.8	0.187
	100	0.85 ± 0.5	0.363
H1S3	5	3.8 ± 0.6	0.027
	20	2.5	0.150
	40	1.5 ± 0.5	0.696
	100	1.0 ± 0.25	1.183
H1TS3	5	3.7 ± 0.8	0.031
	20	1.8 ± 0.3	0.214
	40	1.1 ± 0.1	0.347
	100	0.63 ± 0.2	0.715

Figura 7 – Tabela relacionando a ductilidade do metal com o volume das porosidades para quatro diferentes ligas. [21]

Por trazerem estes problemas com relação às características e propriedades, a porosidade é um dos piores defeitos que se pode ter em peças metálicas.

3.2.3. Possíveis soluções das porosidades

As indústrias de fundição fazem o possível para se remediar e tentar acabar com esses defeitos e não o terem durante sua produção. Porque, normalmente, quando se há porosidades nas peças, ela é descartada, fazendo com que a indústria perca parte do produzido, ou seja, dinheiro.

Não existe uma receita do que deve ser feito para se evitar porosidades, pois cada fundição é um caso diferente, que dependerá da liga utilizada, do tipo de vazamento, tipo de molde, se há resfriadores, entre tantos outros fatores que tornam cada caso de fundição único. Todavia, há algumas dicas e possíveis soluções em comum que funcionam para alguns casos de indústrias.

Alguns desses processos que são realizados com a finalidade de resolver o problema das porosidades são:

- Colocar metal líquido em excesso durante o vazamento, em maior quantidade do que o necessário para preencher as cavidades, com o intuito de compensar as contrações do metal;
- O uso de resfriadores em lugares específicos da peça, devido ao fato de que quando se resfria o metal com taxas de resfriamento maiores, menores são as ocorrências e os tamanhos das porosidades (Figura 8);
- Uso de massalotes, que apresentam um grande volume e fazem parte do sistema em que o metal líquido será vazado, com o propósito de ser a última parte preenchida pelo metal, de armazenar o calor e ser a última parte a ser solidificada, assim, concentrando as porosidades no massalote e não na peça. A Figura 9 a seguir, mostra que quanto maior

o massalote em tamanho e volume, menores serão as porosidades internas e os rechupes externos na peça;

- Confecção do sistema de canais, de modo que quando o metal for vazado, não ocorram aspirações de ar e nem turbulências que possam causar possíveis aspirações;
- E, a desgaseificação do metal líquido, fazendo com que diminua a quantidade de gases dissolvidos no metal, especialmente o gás hidrogênio, de modo que quando este metal solidificar os gases dissolvidos não sejam capazes de precipitar e causar porosidades. [14 – 16]

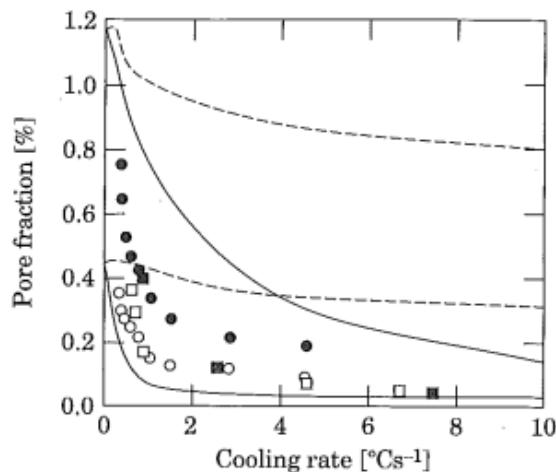


Figura 8 – Gráfico relacionando a fração de poros com a taxa de resfriamento do metal. [15]

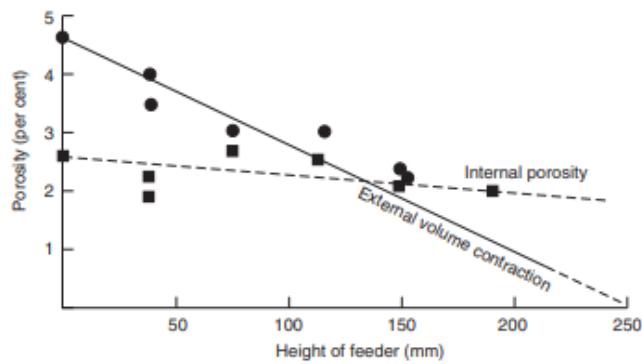


Figura 9 – Gráfico relacionando a quantidade de porosidades e contrações do metal com o tamanho do massalote. [14]

Para que as indústrias possam tomar as medidas certas e tentem resolver os problemas, utilizando o melhor método para solucionar o seu caso específico, ela precisa saber aonde as porosidades estarão, em que parte os poros se apresentam para seguir com uma produção sem problemas.

Entretanto, muitas fábricas descobrem estes defeitos apenas após produzirem parte das peças e vendo as porosidades na prática, tendo que descartá-las, perdendo o dinheiro desta produção, para então começar a tomar as medidas cabíveis nas produções seguintes, e sem saber se esta mudança realmente eliminará as porosidades ou não, sendo outra leva da produção que pode ser perdida. [22]

Assim sendo, um dos melhores jeitos de se prevenir destes problemas sem que haja perda de peças e saber o que pode ser feito para solucionar os defeitos antes mesmo de que eles ocorram nas indústrias é através das modelagens matemáticas e simulações. [23]

3.3. Modelagem Matemática

O modelamento matemático utiliza de equações e fórmulas matemáticas, em sua teoria, para expressar parâmetros, relações, variáveis, previsões etc. Para analisar o desempenho de sistemas complexos na prática.

3.3.1. Modelagem Matemática relacionado à porosidade

No caso da fundição o modelamento matemático é muito utilizado, pois através de equações e cálculos matemáticos consegue-se ter previsões do que irá acontecer com a peça antes mesmo de acontecer. Pode-se calcular, por exemplo, a transferência de calor pelo metal, a velocidade do metal, a pressão, os pontos quentes, as frações líquidas e sólidas, o tempo de enchimento da peça, o tempo de solidificação e, um dos mais importantes, a porosidade que pode ser gerada. [24]

O maior problema da modelagem matemática em fundições é a grande variedade de variáveis que afetam tanto os cálculos teóricos como a fundição na prática, como a temperatura de vazamento, o tamanho do molde, o formato da peça, o número e tamanho dos resfriadores, o material do resfriador, a liga e o molde utilizados, a densidade do metal, a condutividade e o calor específico do metal e do molde, entre tantos outros fatores que influenciam nas condições de um processo de fundição. [25]

Deste modo, faz-se a programação de computadores e softwares para que os cálculos sejam feitos mais facilmente através de algoritmos, colocando-se apenas os inputs, os valores de entrada e as condições de contorno. Assim, o programa começa a funcionar, a fazer os cálculos necessários e dar as respostas, fazendo com que a modelagem matemática esteja pronta, prevendo os resultados que o usuário quiser ter conhecimento. [26]

Há diversos tipos de modelagens que podem ser feitos para se prever a nucleação e o crescimento de porosidades em um metal, mas nenhum deles leva em consideração todos os fenômenos e variáveis possíveis, devido ao fato de haver muitos fenômenos e muitas variáveis em aberto e sendo uma modelagem muito pesada, complexa e intensa, podendo não ser o melhor custo-benefício e viável para as indústrias. Além disso, devido ao tanto de inputs e condições de contorno envolvidas, a modelagem poderia não ser obtida com total precisão. [27]

Deste modo, os tipos de modelagens propostos para se prever a formação de porosidades, todos apresentando os seus prós e contras, são cinco:

- Soluções analíticas;
- Modelos de funções de critérios, baseados em funções empíricas;
- Soluções numéricas do fluxo geral de Stokes (lei de Darcy), juntamente com as equações de conservação de massa e energia, e equações de continuidade;
- Modelos acoplando o crescimento controlado da difusão do gás hidrogênio com a interação do sistema gás-sólido;

- Modelos usando uma abordagem estocástica da nucleação de poros e grãos, juntamente com soluções contínuas para difusão, levando em consideração as interações poro-microestrutura. [27]

3.3.2. Simulação

A modelagem matemática é feita então através de algoritmos e programações, e representada por simulações em softwares que interpretam os resultados e os mostram de uma forma mais direta ao usuário. A simulação analisa os resultados de forma quantitativa, mostrando os valores e suas magnitudes de qual quer que seja o resultado desejado pela indústria (pressão, porosidade, temperatura...). [5, 6] E cabendo ao usuário uma análise na parte mais qualitativa daquilo que a simulação lhe traz.

Nas últimas décadas as simulações vêm avançando e crescendo cada vez mais, dentre estes avanços temos a aplicação de modelos matemáticos e das simulações em três dimensões (3D), facilitando visualmente as previsões calculadas pelos softwares. [7]

A Figura 10 abaixo, mostra gráficos de comparações feitas por medidas reais e medidas feitas pela modelagem matemática e a simulação. Evidenciando uma boa correlação das simulações com a prática. [7]

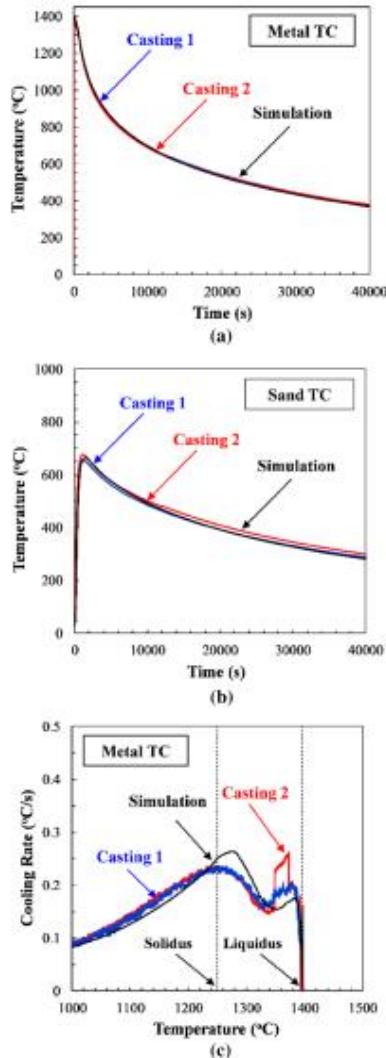


Figura 10 – Comparações de medidas na prática com a simulação. (a) Temperatura do metal pelo tempo; (b) Temperatura do molde pelo tempo; (c) Taxa de resfriamento do metal pela temperatura. [7]

A grande vantagem da simulação além de economizar o dinheiro da fundição, economiza o tempo dessas produções e o fato de se poder alterar a geometria do sistema de canais, alterar o molde, ou seja, fazer os testes necessários para achar o sistema geral perfeito para a sua peça antes de produzir todo o ferramental necessário, podendo realizar a otimização e a manipulação dos parâmetros de processo da produção antes mesmo de começar a produzir a peça final. [22,25,28]

3.3.3. Funcionamento da Simulação

O software confecciona as simulações para se obter as previsões que se deseja através de, basicamente, cinco passos a serem seguidos:

- Importação da Geometria CAD do fundido e de todo ferramental que será simulado (Figura 11);
- Confecção de uma malha geométrica 2D e volumétrica 3D em todas as peças a serem analisadas (Figura 12);
- Inserção dos inputs, dados de entrada, condições de contorno, parâmetros de processo, tudo o que estará envolvido com o sistema;
- Realização dos cálculos e da modelagem matemática em todos os nós criados pelas malhas pelo software para geração dos resultados;
- Resultados calculados de forma quantitativa para análise qualitativa do usuário (Figuras 13 e 14). [7, 24, 29]

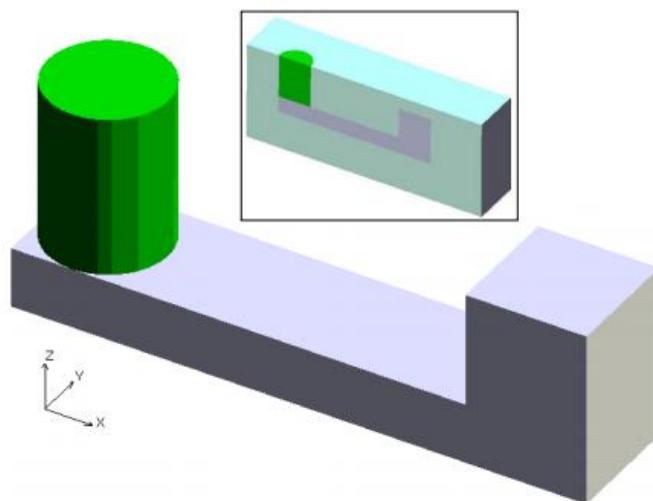


Figura 11 – Exemplo de geometria CAD a ser inserida no software (a imagem maior representa a geometria da peça a ser fundida fora do molde; já a imagem menor dentro do quadrinho representa a geometria cortada da peça a ser fundida dentro do molde). [24]

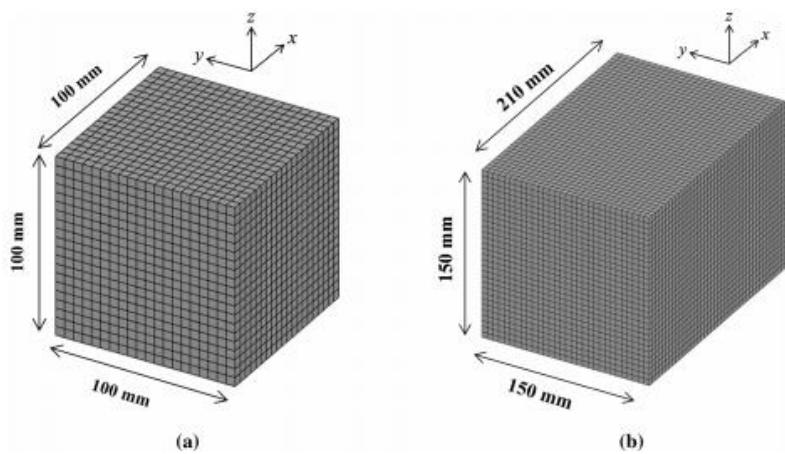


Figura 12 – Exemplo da confecção de malhas geométricas 2D. (a) Representa uma malha mais grossa; (b) Representa uma malha mais fina. [7]

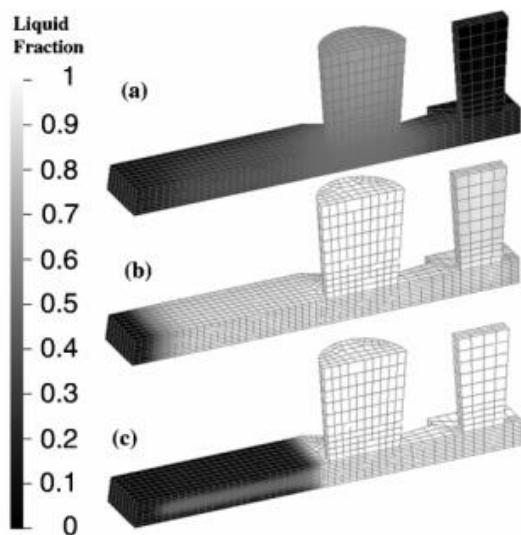


Figura 13 – Exemplo do resultado de fração líquida da peça ao longo do tempo de solidificação. (a) Peça sem resfriador após 700s; (b) Peça com resfriador após 100s; (c) Peça com resfriador após 30s. [29]

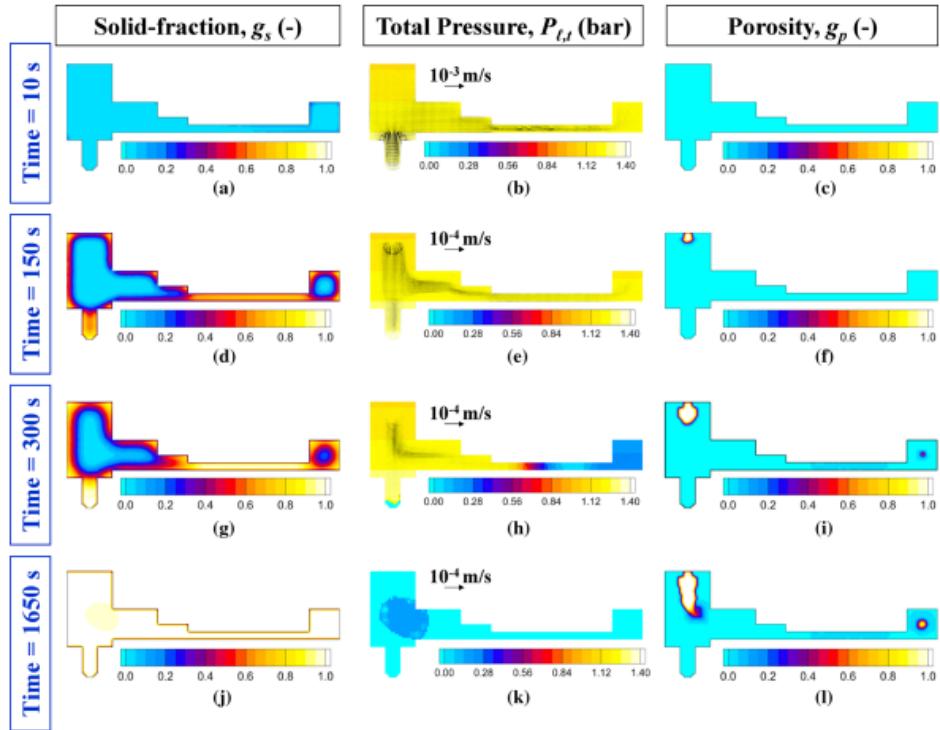


Figura 14 – Exemplo de três resultados distintos (fração sólida, pressão total e porosidade) em função do tempo de solidificação. [7]

3.3.4. ProCAST/QuikCAST

O ProCAST e o QuikCAST, ambos desenvolvidos pela ESI Group, são os softwares utilizados para realizar a modelagem matemática e a simulação de peças fundidas. Estes softwares funcionam, basicamente, através dos cinco passos ditos acima (seção 3.3.3.), no qual os cálculos se baseiam no método dos elementos finitos (no caso do ProCAST) e no método de diferenças finitas (no caso do QuikCAST) para solucionarem os problemas das devidas equações. Ambos os métodos numéricos (FEM e FDM), são métodos de discretizações de equações diferenciais para que sejam facilitados os cálculos destas equações nos problemas. A grande diferença entre estes dois métodos é o seu método de discretização, que para o FDM é representado por um conjunto de pontos de grade, dificultando assim a sua utilização para problemas com regiões de formas mais irregulares e complexas, e para o FEM é representado por elementos triangulares e/ou quadrangulares, apresentando uma melhor representação para problemas mais complexos (ou seja, cálculos melhores aproximados).

Elementos esses que são gerados durante a confecção da malha geométrica (2D) e volumétrica (3D). [30 – 35]

Os softwares abrangem uma grande diversidade de tipos de processos de fundição, como: fundição por gravidade areia, gravidade coquilha, alta pressão, baixa pressão, cera perdida, entre tantos outros. [32,36]

Há ainda, dentro dos softwares, uma vasta base de dados padrão, com ligas do fundido, materiais do molde, coeficientes de transferências de calor, pressões etc. Dados para se utilizar nos valores de entrada e condições de contorno da simulação, mas também se tem a possibilidade de ter uma base de dados criada pelo próprio usuário. [32]

A Figura 15 abaixo, mostra um fluxograma do passo a passo que se compõe o ProCAST para se realizar a simulação de uma peça através da fundição por cera perdida. [31]

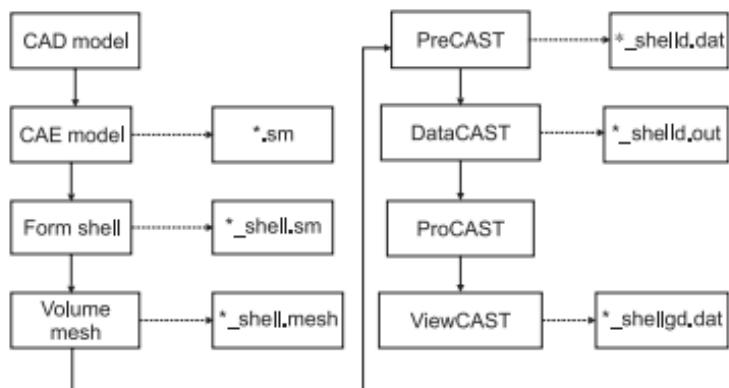


Figura 15 – Exemplo de um fluxograma do passo a passo de uma simulação no ProCAST. [31]

O ProCAST/QuikCAST apresentam, basicamente, três ambientes onde o usuário deve trabalhar. De “CAD model” até “Volume mesh” (Figura 15) se trabalha em um ambiente chamado de “Visual-Mesh”, onde se introduz a geometria CAD e se produz as malhas. Após a geração da malha vai se para o “Visual-Cast”, onde se encontra o “PreCAST” e se coloca os inputs e os valores necessários à simulação. Depois, utiliza-se o “DataCAST” e o “ProCAST” que são os solucionadores do software para se resolver os cálculos e assim gerar os

devidos resultados. E, através do ambiente “Visual-Viewer” pode-se visualizar os resultados obtidos pelo software. [31, 32]

4. Materiais e Métodos

No estudo de caso conduzido no presente trabalho, uma válvula do tipo joelho de descarga selada foi fundida em uma liga de Al em um molde de aço e porosidades foram identificadas na sua estrutura. Um software computacional foi utilizado para simular o escoamento do metal líquido e a transferência de calor durante o preenchimento do molde, a solidificação da liga e o resfriamento até a temperatura ambiente, possibilitando a previsão das porosidades formadas. As informações experimentais relativas às porosidades formadas foram comparadas às previsões fornecidas pelas simulações. Após modificações no desenho da peça com o objetivo de reduzir ou eliminar as porosidades, novas simulações foram conduzidas para se avaliar a eficácia dessas modificações.

4.1. Fundição real da peça

A peça foi produzida na fundição Vlados (“The Ultimate Valves Technology”), localizada no bairro do Ipiranga na cidade de São Paulo, indústria que produz diversos tipos de válvulas, engates, ponteiras, porta mangote, tampas de válvulas etc.

O tipo de processo que a fundição Vlados trabalha é o de gravidade coquilha, sendo que os seus canais principais dos projetos se encontram sempre na direção vertical. A indústria trabalha também, apenas com ligas de alumínio e uma liga apenas de latão.

4.1.1. Materiais utilizados

A liga utilizada pela indústria para confeccionar a peça foi uma de Alumínio, a SAE-323 (6,50 – 7,50% Si, 0,50% Fe, 0,25% Cu, 0,35% Mn, 0,25 – 0,45% Mg, 0,25% Ni, 0,35% Zn, 0,25% Sn e o restante de Al), que apresenta as seguintes propriedades físicas e mecânicas: [37]

- Peso específico em temperatura ambiente (g/cm^3): 2,68
- Curva de densidade ao longo da temperatura (Gráfico 1):

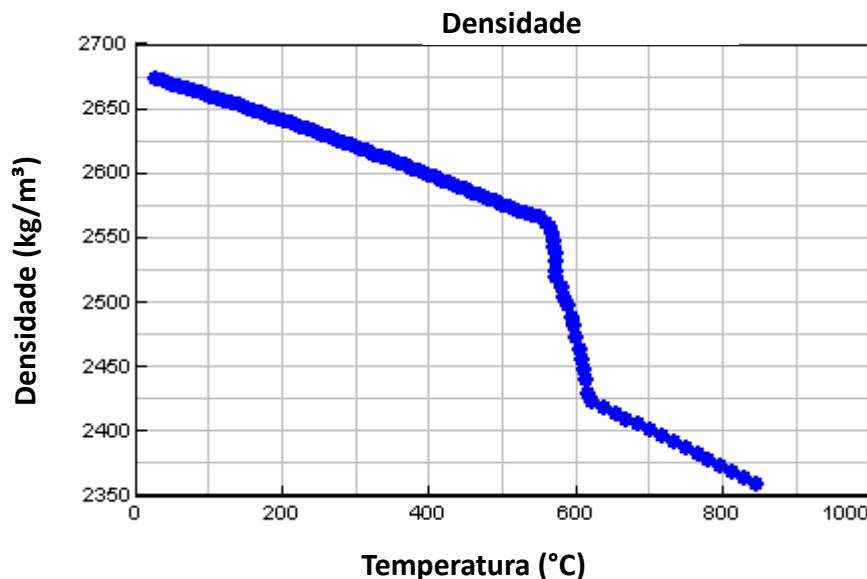


Gráfico 1 – Densidade da liga em função da sua temperatura. [Software QuikCAST]

- Intervalo de solidificação (°C): 620 – 560
- Coeficiente de dilatação térmica (20 a 200°C): 0,0000225
- Condutibilidade Elétrica (IACS %): 36
- Resistência à tração (kg/mm^2): 16 – 20 (Coquilha)

14 – 17 (Areia)

- Alongamento (%): 3,0 – 5,0 (Coquilha)

2,0 – 4,0 (Areia)

- Dureza Brinell: 55 – 75 (Coquilha)

50 – 70 (Areia)

- Curva de fração sólida ao longo da temperatura (Gráfico 2):

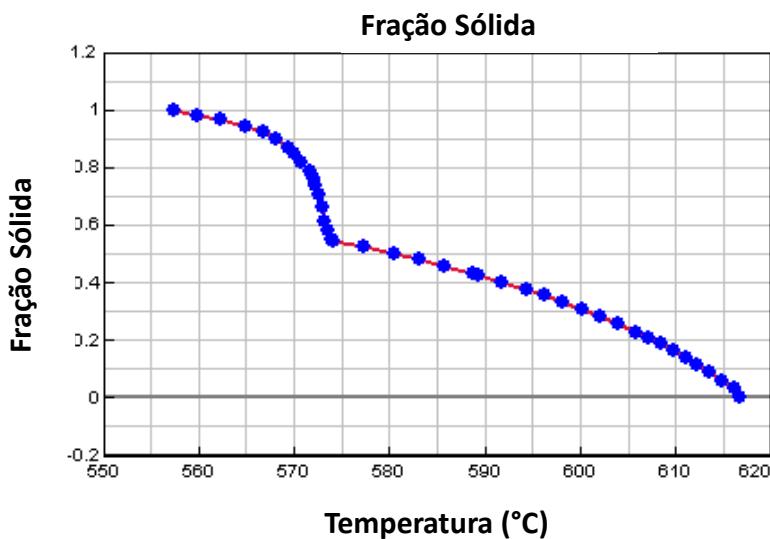


Gráfico 2 – Fração sólida da liga em função da sua temperatura. [Software QuikCAST]

A partir do diagrama de fases a seguir (Figura 16), referente as ligas de Alumínio-Silício, pode-se ver que esta liga, SAE-323, se trata de uma liga hipoeutética:

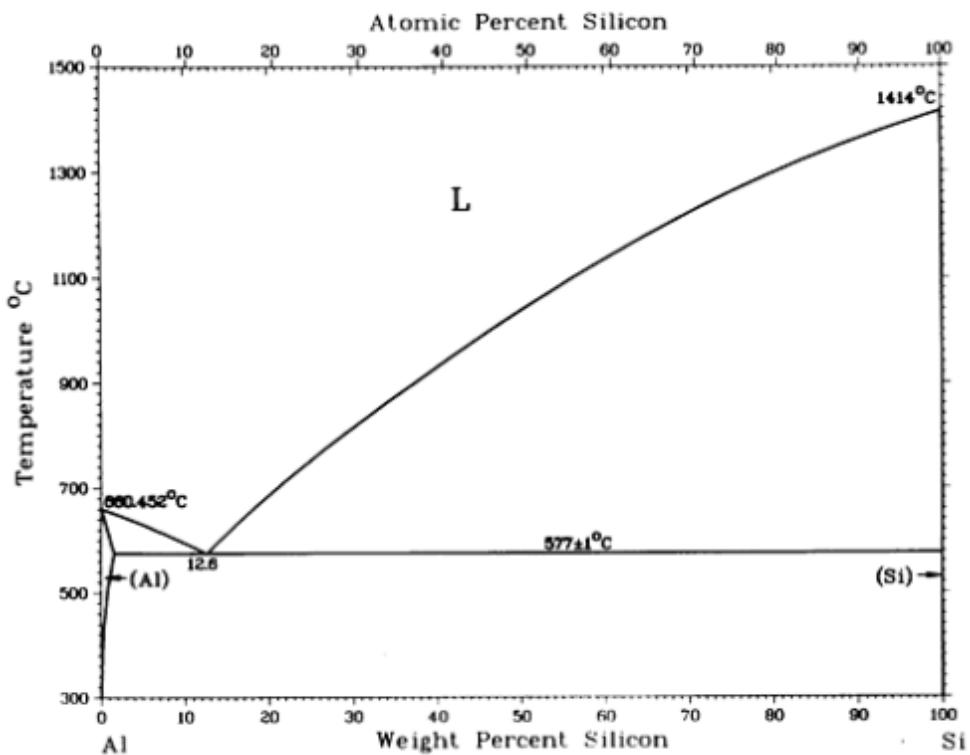


Figura 16 – Diagrama de fases Al-Si. [ASM-HANDBOOK, 10th ed., v. 3, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1992]

O material utilizado para o molde foi o aço AISI 1045 (de composição química: 0,45% C, 0,75% Mn, e máx. 0,05% S), que apresenta uma dureza Brinell média de 180 HB e uma resistência mecânica de, aproximadamente, 64kg/mm². [38] E, o material do macho empregado é a areia do tipo shell molding, que apresenta uma areia resinada com aditivos específicos, com uma ótima resistência a frio e a quente e uma boa fluidez.

4.1.2. Método empregado

O processo de fundição utilizado para a realização de ambas as maneiras de produção da válvula (Figuras 17a e 17b) foi o por gravidade em coquilha, no qual o metal líquido é vazado para dentro dos moldes (coquilhas) utilizando a ajuda da força da gravidade. [39]



(a)



(b)

Figura 17 – Válvula produzida na fundição Vlados após usinagem: peça (a) em pé e (b) deitada. (Fonte: fundição Vlados)

Para este processo, realizado na indústria Vlados, utilizou-se as seguintes condições de processo:

- Temperatura de vazamento do metal: 750 – 770°C;
- Temperatura inicial do molde: 300°C;
- Temperatura inicial do macho: 30°C;
- Tempo de preenchimento da cavidade: 9 – 11 segundos;
- Tempo de abertura do molde: ~ 135 segundos;
- Tempo de ejeção da peça: ~ 150 segundos;
- Tempo total de ciclo: ~ 200 segundos.

Além destas condições, tem-se a utilização de pinturas e tintas em algumas regiões do molde:

- uma camada de DYCOTE 34 em toda a região da cavidade em que se encontrará o metal e na interface entre os moldes, com, mais ou menos, 0,2 mm de espessura;
- uma camada de DYCOTE 140 nas regiões da cavidade em que se encontram o canal e os massalotes da peça, com uma espessura de, aproximadamente, 0,8mm.

Também, para a fabricação da válvula foram utilizados nos moldes e cavidades: 5 canais de ataque para a peça, 2 a 3 massalotes e 4 saídas de ar (respiros) (Figura 18).

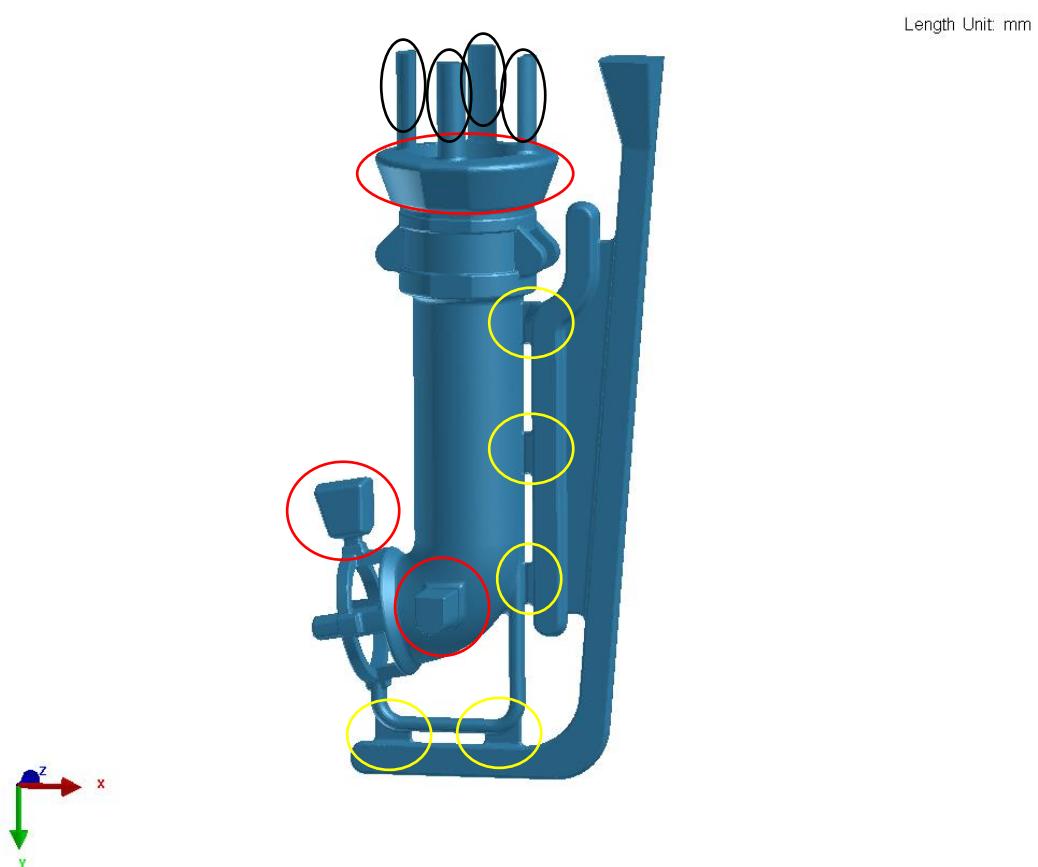


Figura 18 – Representação da peça com contendo canais (canais de ataque circulados em amarelo), massalotes (circulados de vermelho) e saídas de ar (circuladas de preto). (Fonte: software QuikCAST)

As duas variações feitas na fabricação desta peça foram: (a) sem o massalote lateral; e (b) com o massalote lateral. Como representadas pelos modelos a seguir (Figuras 19a e 19b).

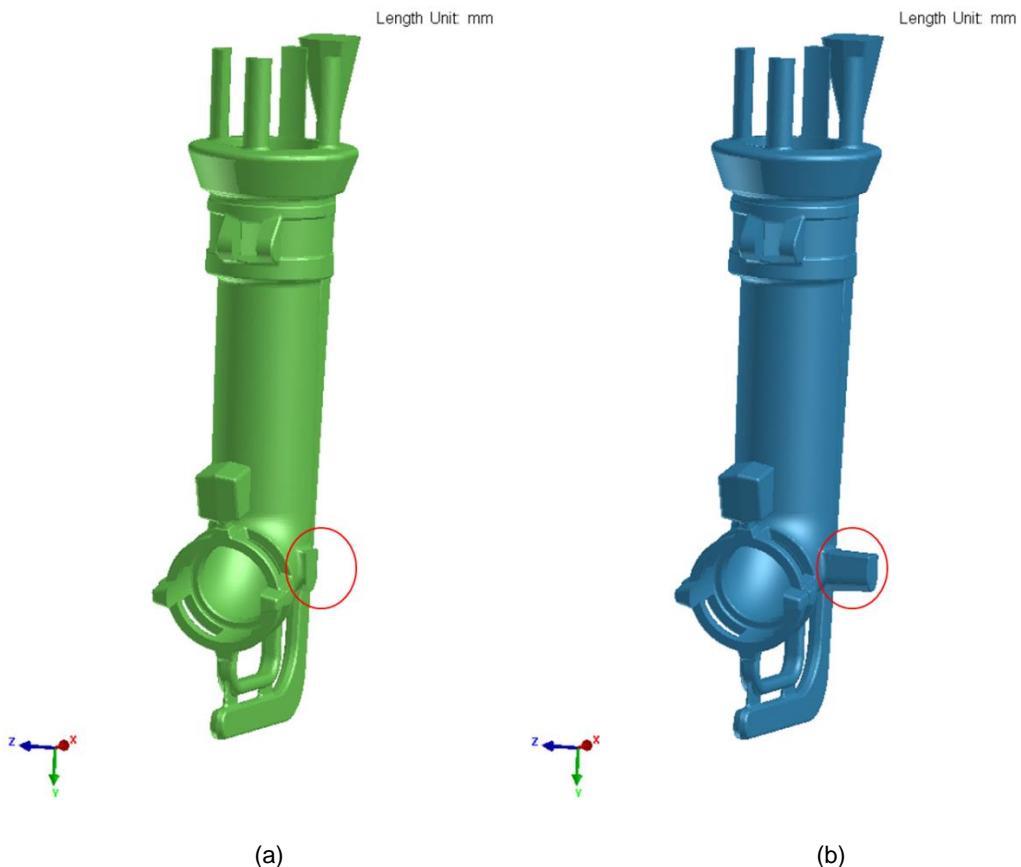


Figura 19 – Desenho da peça contendo massalotes e canais de enchimento (a) sem masslote lateral; (b) com o masslote lateral. (Fonte: software QuikCAST)

4.2. Simulação da Fundição

O software utilizado para este estudo de caso foi o QuikCAST versão 14.5, que utiliza do método numérico de diferenças finitas para solucionar as equações envolvidas no processo de fundição. E, para a operação do software usou-se uma máquina Dell Latitude 3490, processador Intel(R) Core(TM) i7-8550U CPU @1.80GHz – 8 núcleos e memória RAM de 8 GB.

Calculou-se para todas as simulações tanto a parte de enchimento das cavidades como a parte térmica, de solidificação. E, algumas das principais equações utilizadas pelo software para estas simulações foram:

- A equação de conservação de massa descrita por uma equação de continuidade (assumindo que a fase sólida não está em movimento e não sofra deformação):

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_s g_s + \rho_l g_l] + \operatorname{div}(\rho_l g_l v_l) = 0 \quad (1)$$

- A equação de fluxo de Darcy:

$$g_l v_l = -\frac{K}{\mu} [\nabla p_l - \rho_l g] \quad (2)$$

- E, o cálculo dos coeficientes de troca térmica entre os volumes:

$$\frac{1}{h_{eq}} = \frac{d_{alloy}}{\lambda_{alloy}} + \frac{d_{mold}}{\lambda_{mold}} + R_{th} \quad (3)$$

Onde, R_{th} um termo caso haja condições de contorno térmicas adicionais (die coating, resistência térmica ao contato etc.).

Assim, a partir da equação (3) foram-se feitos então os cálculos dos coeficientes de troca térmica, sabendo que utilizou-se de uma condição de resistência térmica ao contato de $0,0001 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ entre as cavidades e o molde, duas camada de pinturas (die coatings) como descritas pelo método empregado pela fundição Vlados e um coeficiente de troca térmica dos moldes com o ambiente de $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (considerando uma temperatura ambiente de 20°C). Infelizmente, no QuikCAST, o valor dos coeficiente calculados pelo software não são possíveis de serem vistos na versão 14.5.

4.2.1. Metodologia do software

O primeiro passo para se realizar a simulação foi a importação das geometrias CAD que foram desenhadas (moldes, machos e as cavidades) (Figura 20), todas as partes envolvidas no processo devem ser desenhadas já em suas posições, e assim abertas na interface Visual-Mesh. Nesta interface, inicialmente, verificou-se a geometria CAD, se ela está correta e não apresenta nenhum erro, e então, gerou-se os STL destas geometrias, ou seja, a malha 2D (Figura 21).

A malha bidimensional criada, como mostrada na Figura 21, é formada por vários elementos com o formato triangular que representam a superfície das geometrias. Para este trabalho, utilizou-se tamanhos de elementos de 5mm para os moldes, 4mm para o macho e 2mm para a peça (sempre refinando mais nas partes em que se quer resultados mais precisos), tendo-se um total de, aproximadamente, 705.500 elementos 2D para cada versão das simulações.

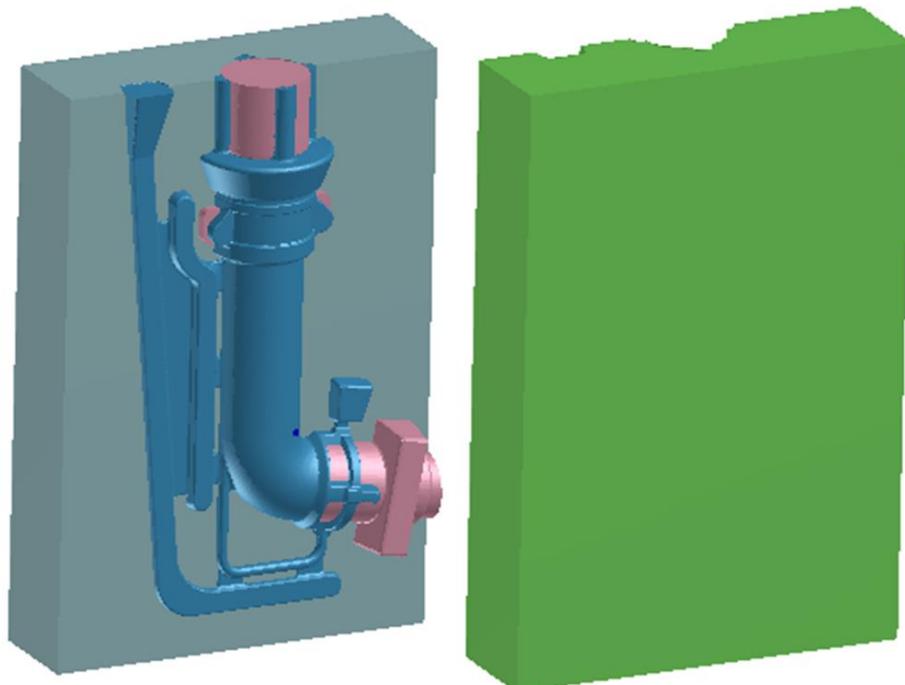


Figura 20 – Geometria CAD de todas as partes (moldes em cinza e verde, macho em rosa, e cavidades em azul). (Fonte: software QuikCAST)

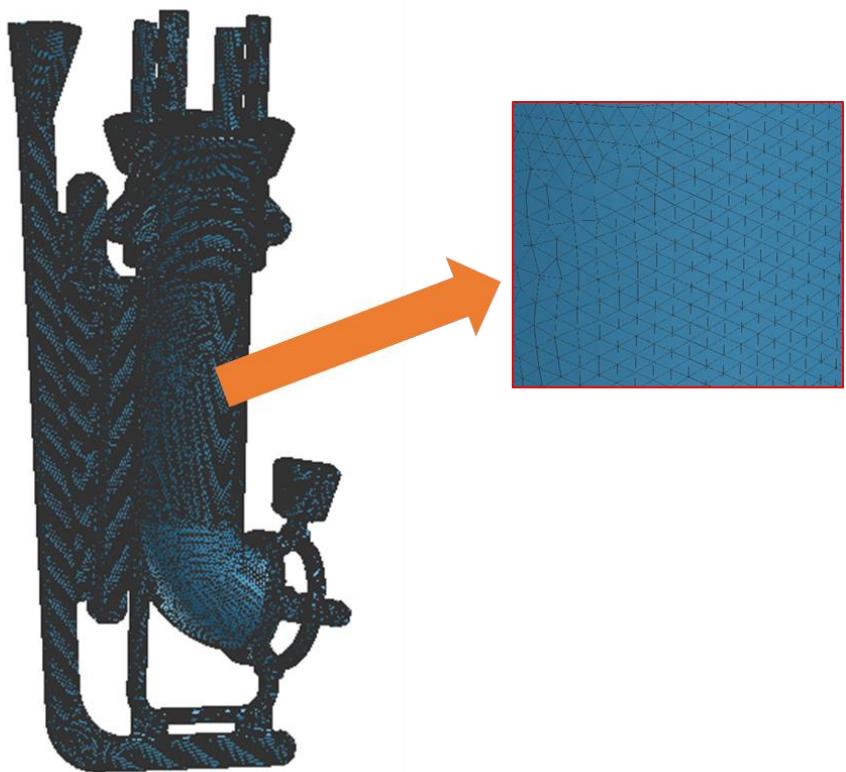
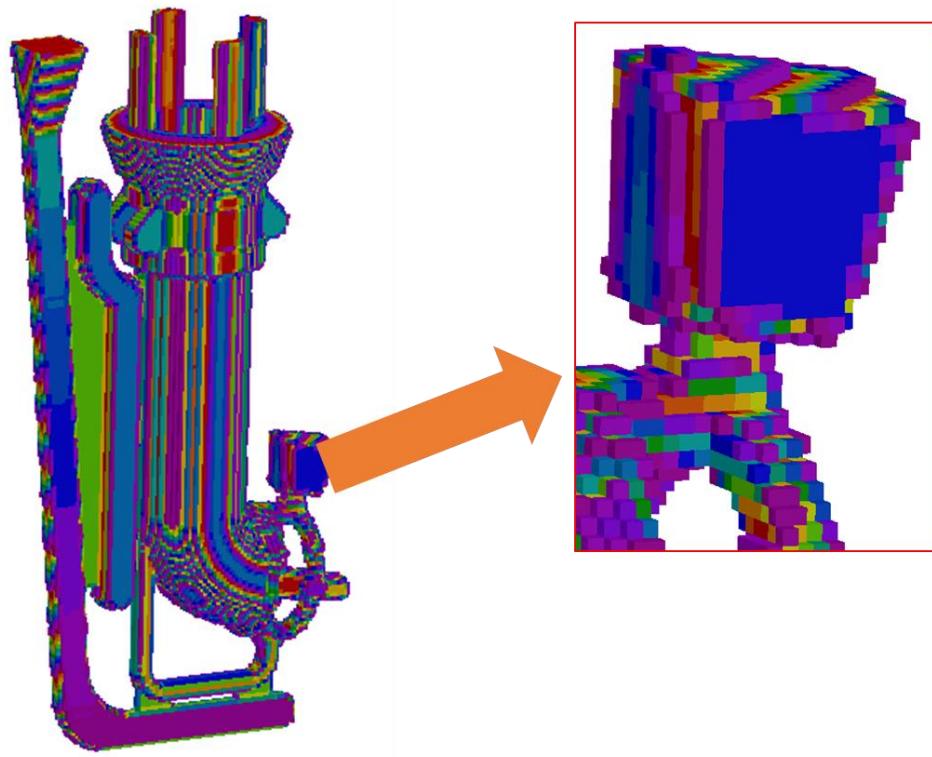


Figura 21 – Representação da malha 2D (STL) gerada através do CAD das cavidades. (Fonte: software QuikCAST)

Depois de gerada esta malha 2D, passou-se para a interface Visual-Cast, onde foram inseridas todas as informações necessárias para que fossem feitos os cálculos da simulação, como a direção da gravidade, os materiais utilizados para cada volume, suas temperaturas iniciais e todas as condições de processo e de contorno como foram descritas pela indústria Vlados em sua metodologia prática. Após a entrada de dados, gerou-se a malha tridimensional (3D) (Figura 22), analisou-se esta malha e, por fim, iniciou-se a simulação.



*Figura 22 – Modelo da malha 3D da peça, representada por vários cubos com que a mesma é formada.
(Fonte: software QuikCAST)*

No caso dos cálculos das porosidades formadas, o software QuikCAST considera a parte térmica, a curva de densidade da liga e a sua solidificação, em espaços em que há um isolamento de massa líquida e onde, dependendo da capacidade interdendrítica de alimentação da liga, tem-se uma tendência de ocorrer porosidades por rechupe. A equação que o software utiliza para o cálculo do volume destas porosidades é:

- Sabendo que o volume de fração líquida pode ser descrito por:

$$g_l = 1 - g_s - g_p \quad (4)$$

- E, substituindo esta equação (4) na equação de conservação das massas (1), obtemos:

$$div(\rho_l g_l \mathbf{v}_l) - \rho_l \frac{\partial g_p}{\partial t} = -\frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

onde, $\frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial T}$ é dado pela curva de densidade da liga ($\rho \times T$), e $\frac{\partial T}{\partial t}$ é a taxa de resfriamento da liga.

Assim, a partir da equação (5), tem-se o cálculo dos volumes das porosidades dentro do software.

Vale relembrar que o processo de fundição utilizado foi o preenchimento por gravidade em molde metálico (coquilha). Como as coquilhas são utilizadas continuamente para a fundição das peças, acabam atingindo um regime estacionário de aquecimento-resfriamento, o que é chamado de ciclagem térmica. Foram necessários diversos ciclos (10 para cada caso) da mesma peça para atingir a ciclagem térmica, ou seja, a temperatura de trabalho do ferramental, para assim poder simular o preenchimento do molde e a solidificação da peça mostrados no presente trabalho com uma maior precisão.

Pode-se observar na figura a seguir (Figura 23), que com 10 ciclos térmicos do ferramental, foi possível obter valores constantes de temperatura no ferramental, ou seja, o seu regime estacionário de aquecimento-resfriamento de trabalho dos mesmos.

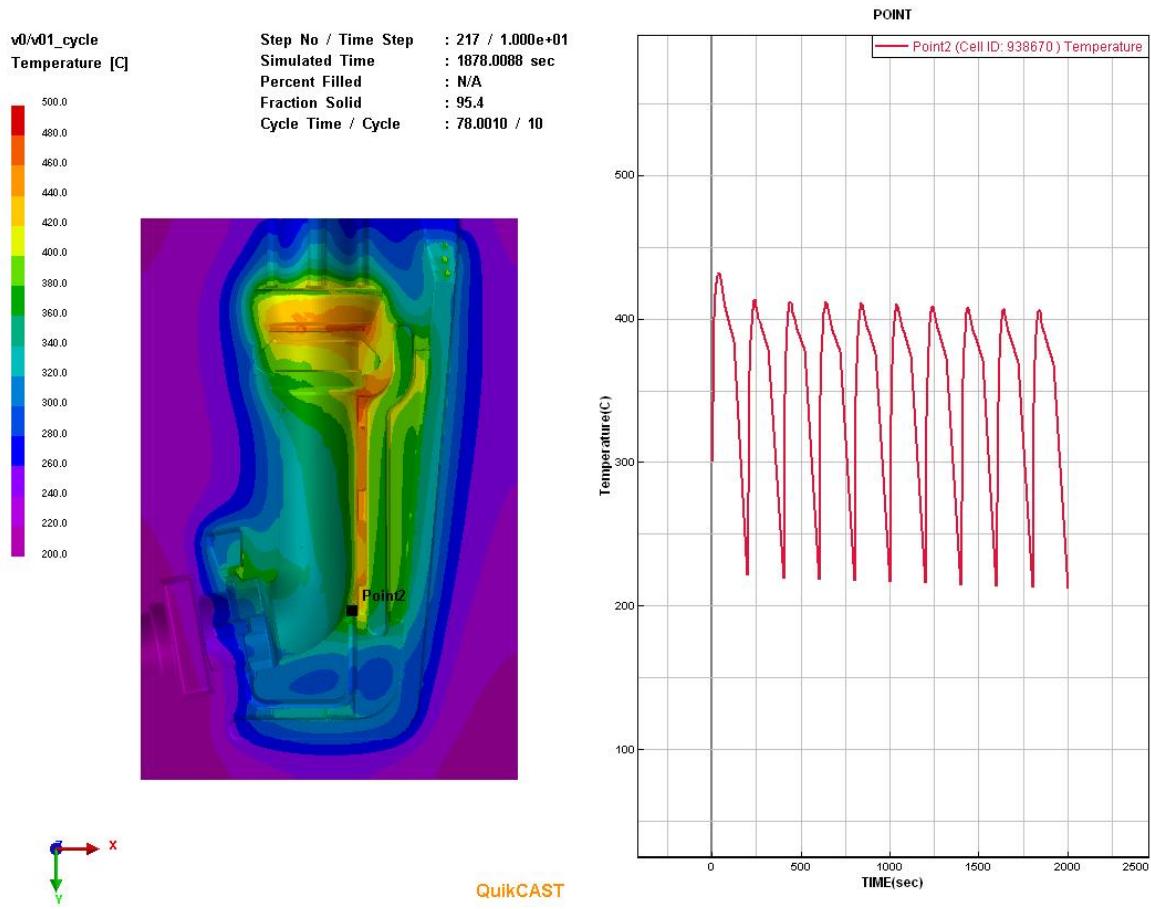
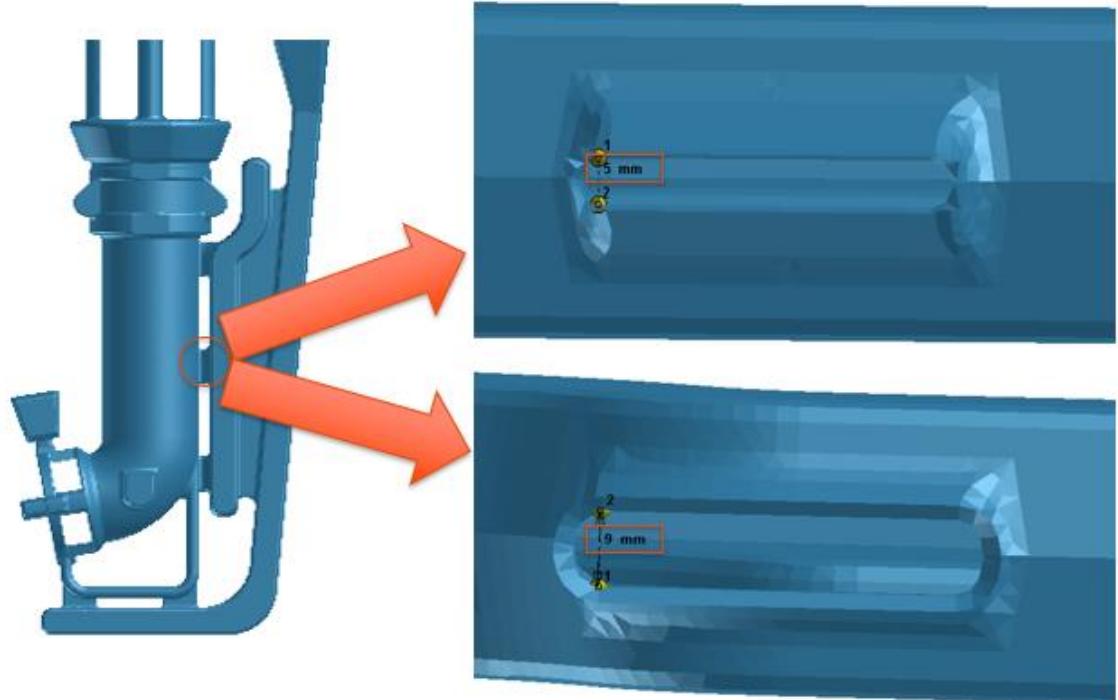


Figura 23 – Representação da ciclagem térmica realizada no ferramental: do lado esquerdo tem-se um ponto escolhido na coquilha fixa, e do lado direito um gráfico de temperatura por tempo demonstrando o alcance do regime estacionário de aquecimento-resfriamento de trabalho deste ferramental. [Software QuikCAST]

Assim, três simulações de preenchimento e solidificação foram realizadas: (1) sem massalote lateral (Figura 19a); (2) com massalote lateral (Figura 19b) e (3) com massalote lateral e canais de ataque mais espessos (Figura 24b). Nesse último caso, todos os ataques, que antes apresentavam uma espessura por volta de 5mm, foram alterados para 9mm. Como mencionado anteriormente, a fundição experimental da peça foi realizada apenas nos primeiros dois casos, ou seja, sem e com o massalote lateral.

Realizou-se a terceira simulação devido ao fato de a fundição Vlados apresentar esta opção (ataques mais largos) como uma possibilidade de fundição futura para esta peça. Sendo fácil realizar esta mudança dos ferramentais.

(a)



(b)

Figura 24 – (a) Espessura dos ataques para as simulações da peça que já foram feitas na prática;
(b) Espessura dos ataques para a simulação extra realizada. (Fonte: software QuikCAST)

5. Resultados e Discussão

Algumas destas válvulas produzidas pela indústria Vlados e após usinadas não apresentaram defeitos algum, como demostradas nas Figuras 17 (a) e (b). Porém, isto ocorre em uma pequena parcela delas, a grande maioria destas peças, após usinadas, apresentaram porosidades por contrações em diversas regiões da peça, que levou a um grande descarte desses produtos. A seguir, estes resultados de porosidades e rechupes que preocupam a fundição Vlados serão mostrados.

Com relação aos resultados apresentados em seguida, de rechupes e porosidades das simulações realizadas no software QuikCAST, serão tanto os de fração sólida, em que se avalia os isolamentos de massas líquidas no interior da peça e a direção de solidificação do metal dentro do produto, como o de previsão de porosidades por contração e rechupes em si.

5.1. Fundição sem o massalote lateral

Os principais locais de porosidades e rechupes encontrados na válvula sem o massalote lateral obtidos pela fundição Vlados na prática e as principais regiões de isolamento de massa líquida e previsões de porosidades na simulação foram:

- No bocal da peça (Figuras 26 e 27);

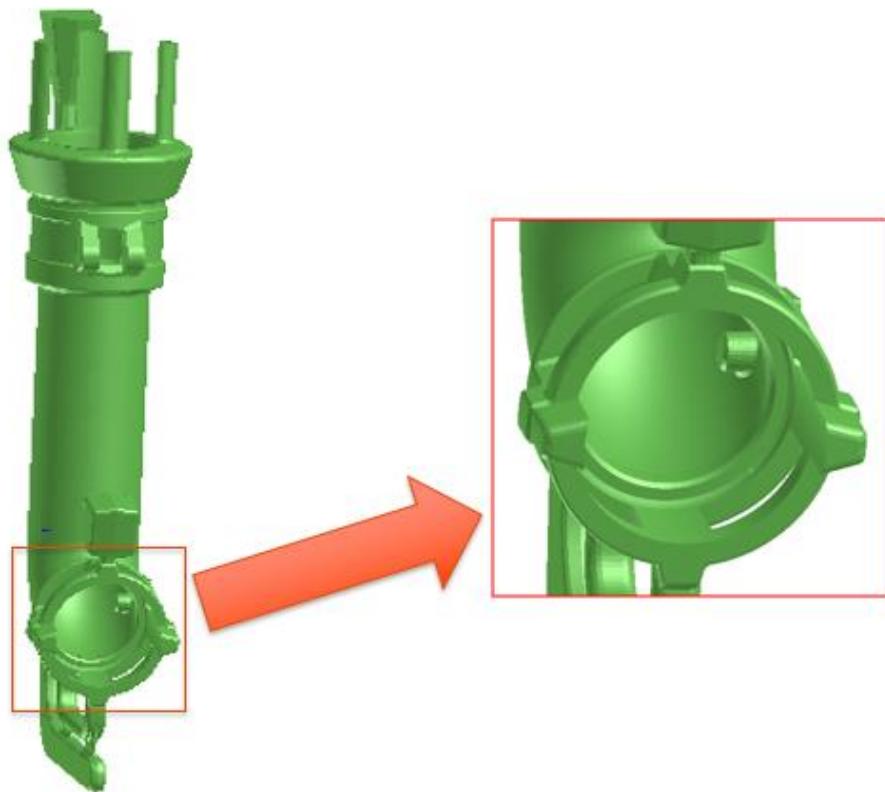
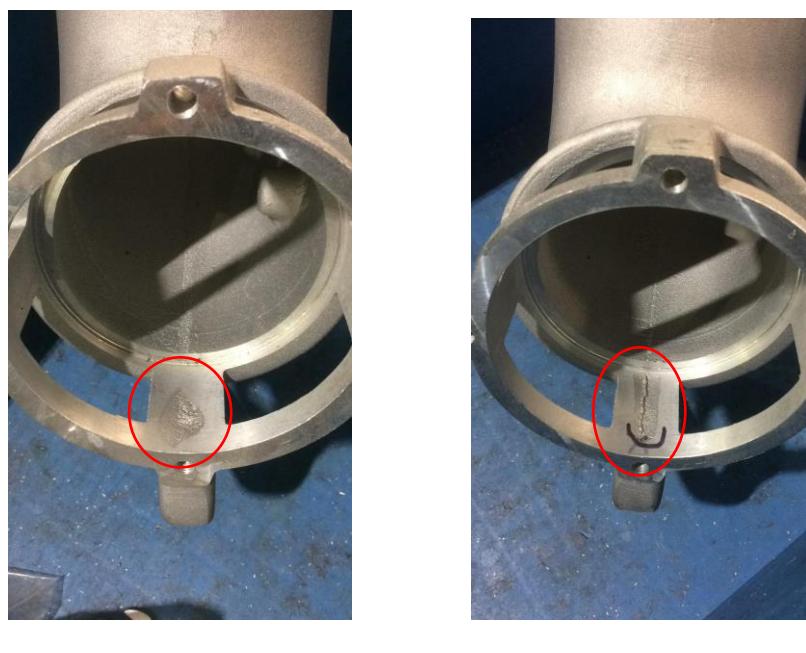


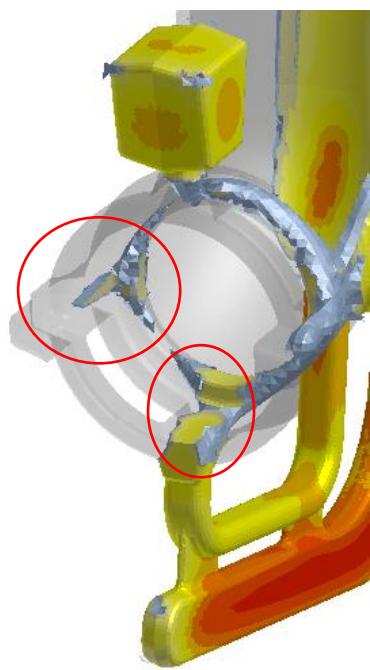
Figura 25 - Representação da região do bocal da peça. (Fonte: software QuikCAST)



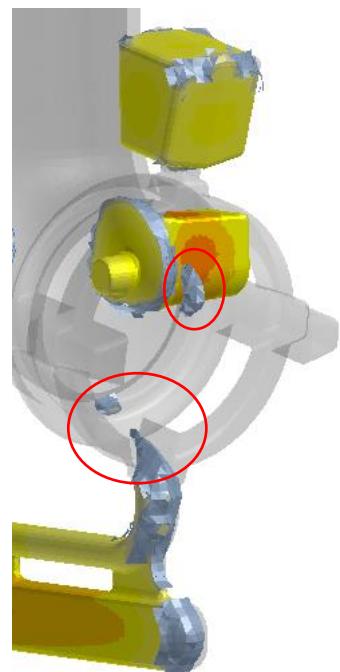
(a)

(b)

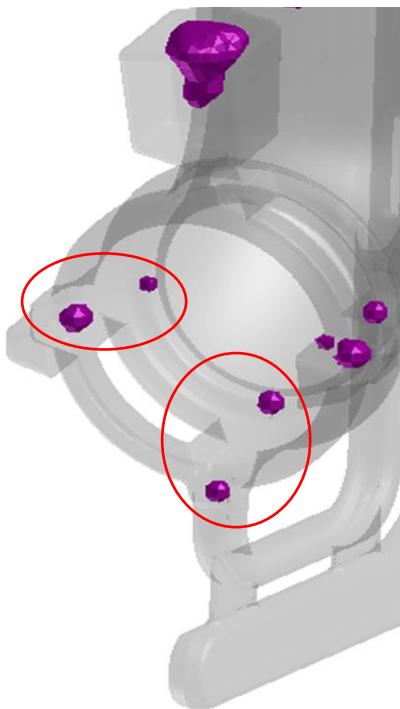
Figura 26 – (a) e (b) Rechups localizados na parte do bocal da válvula. (Fonte: fundição Vlados)



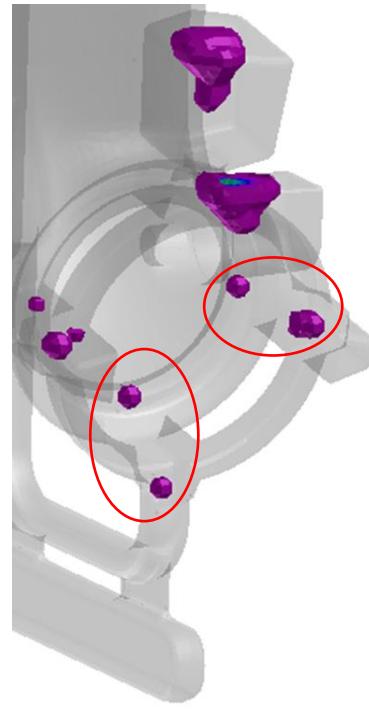
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 27 – Isolamento de massa líquida na região do bocal da peça: (a) com uma vista da direita e (b) com uma vista da esquerda; Previsões de porosidades nesta mesma região do bocal: (c) com uma vista da direita; (d) com uma vista da esquerda. (Fonte: software QuikCAST)

- Na região interna da peça, onde se encontra o pino (Figuras 29 e 30);

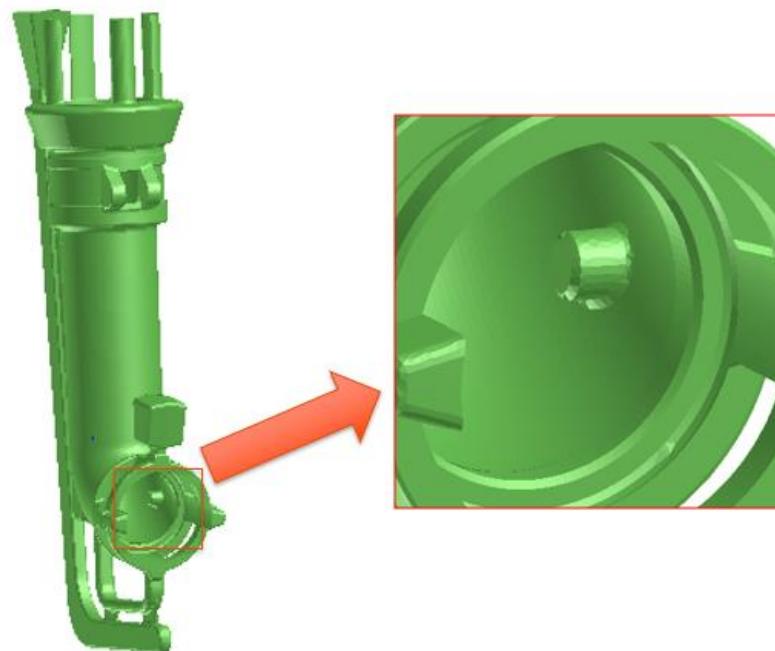


Figura 28 – Representação da localização do pino interno da peça. (Fonte: software QuikCAST)

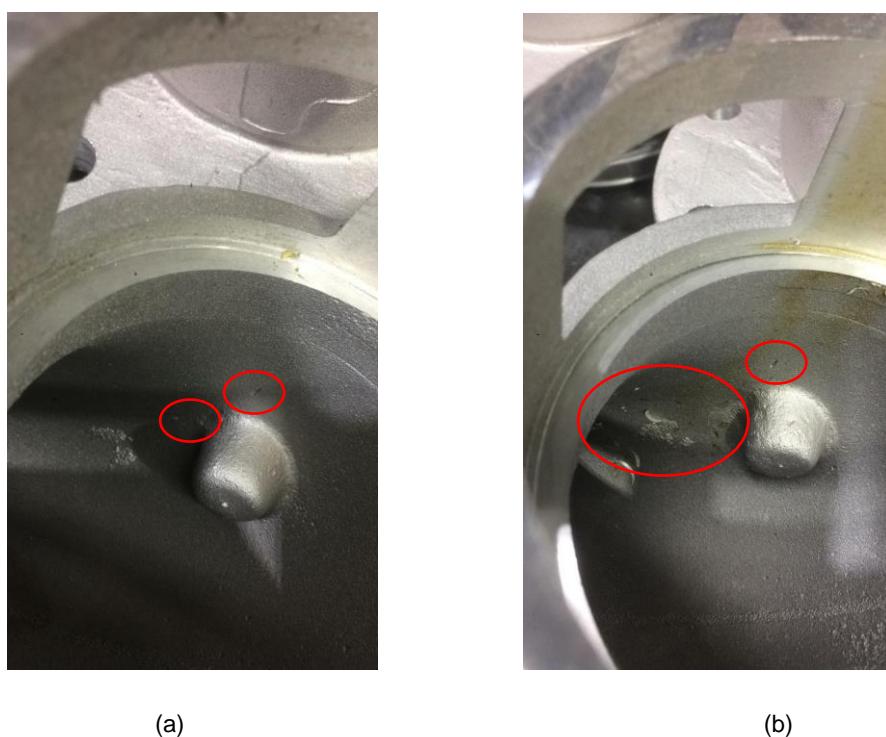
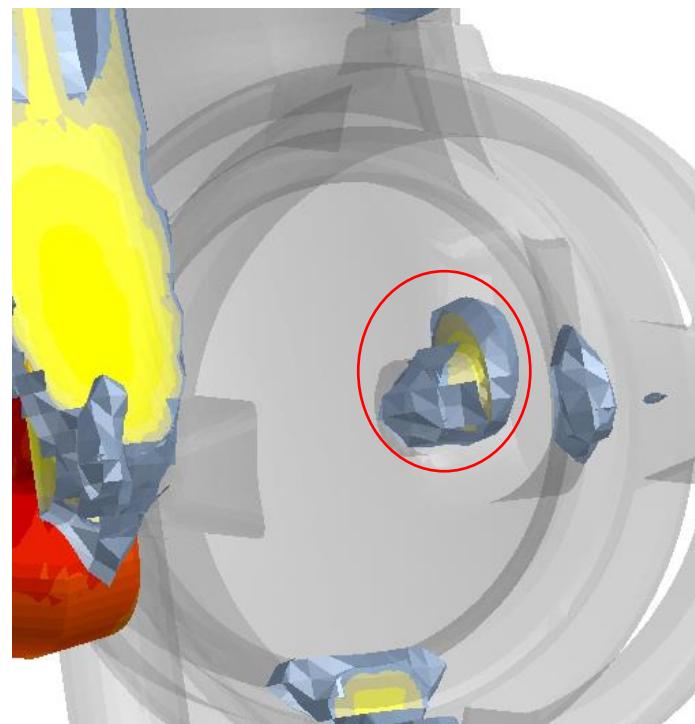
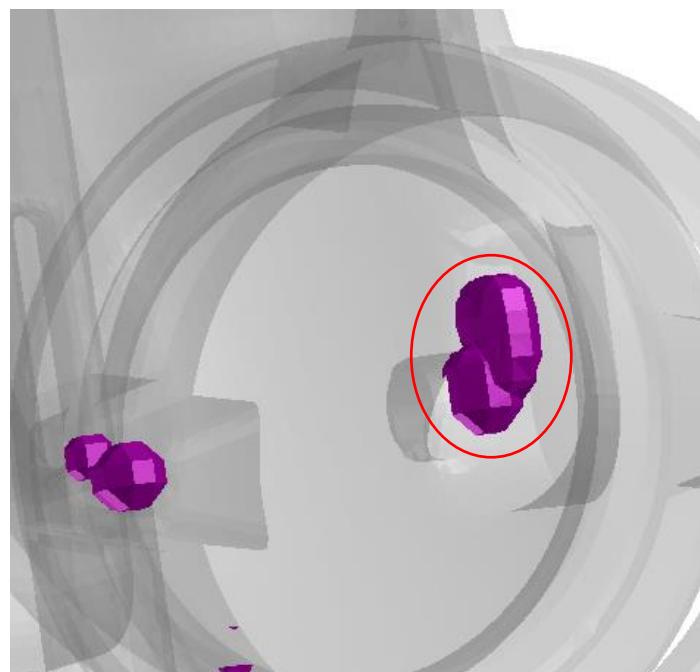


Figura 29 – (a) e (b) Porosidades na região próxima ao pino interno da peça. (Fonte: fundição Vlados)



(a)



(b)

Figura 30 – (a) Isolamento de massa líquida na região do pino interno, quando não se tem o massalote lateral; (b) Previsão de porosidade nesta mesma região, sem o massalote lateral. (Fonte: software QuikCAST)

- Na região próxima a um dos ataques, nas costas da válvula (Figuras 32 e 33).

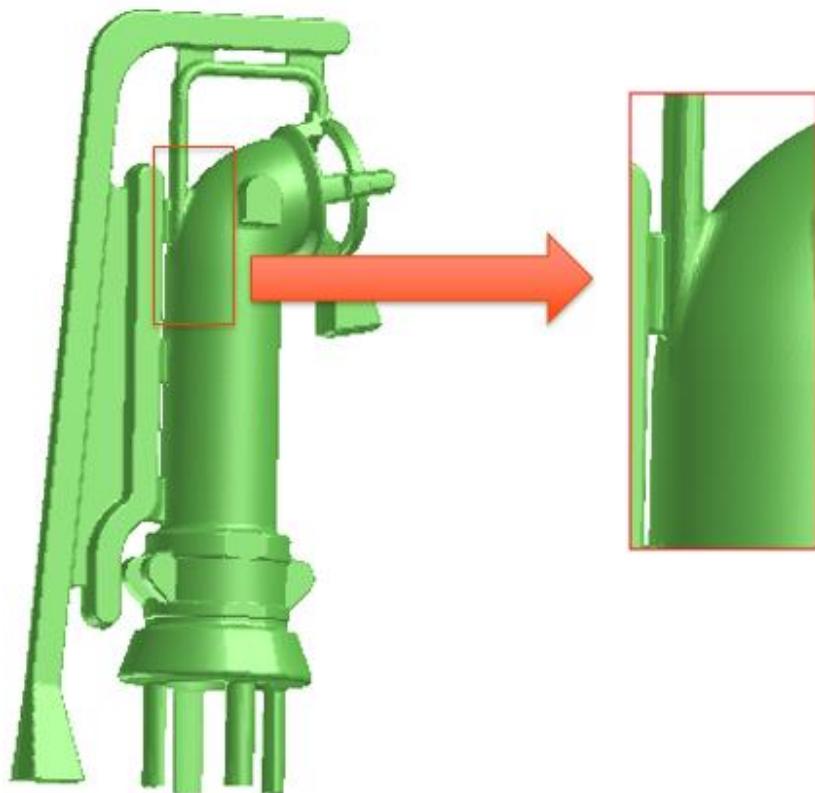
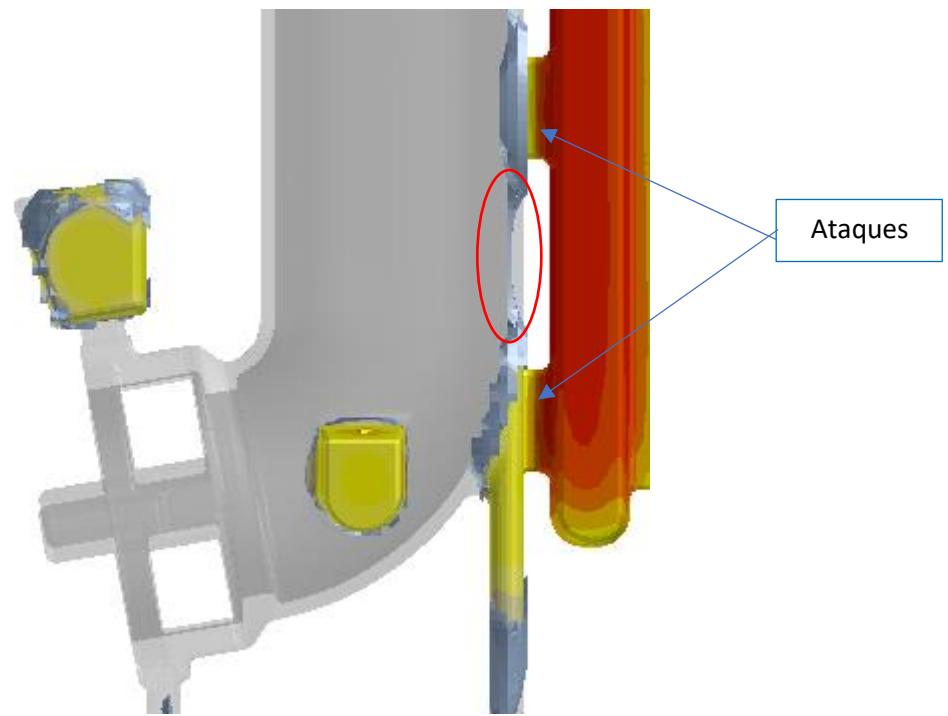


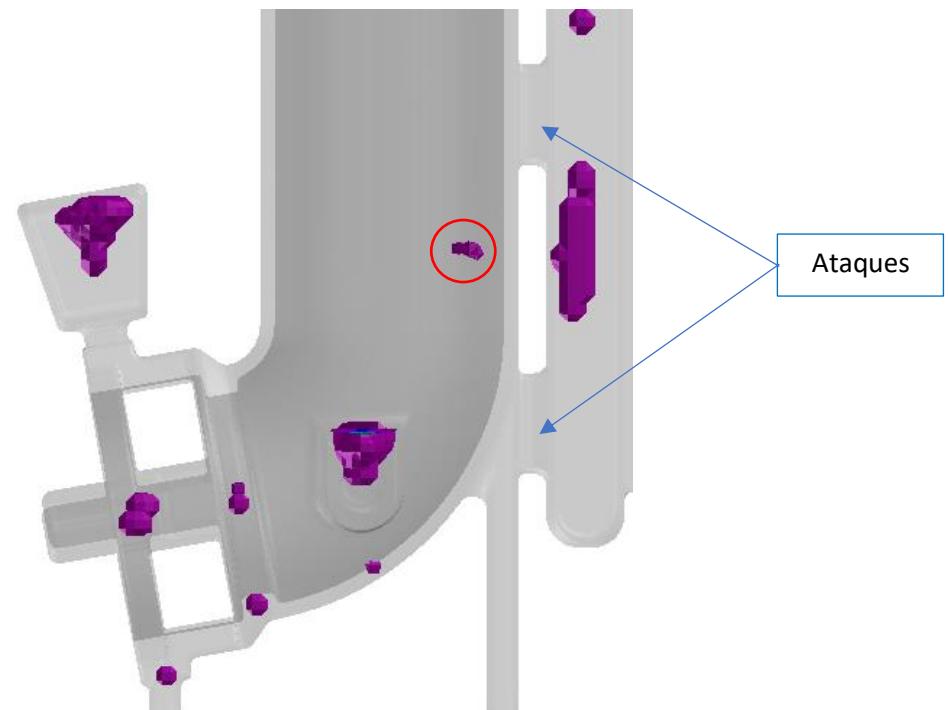
Figura 31 – Representação da localização das costas da peça próxima a um dos ataques. (Fonte: software QuikCAST)



Figura 32 – Presença de rechupe próximo ao ataque inferior da peça. (Fonte: fundição Vlados)



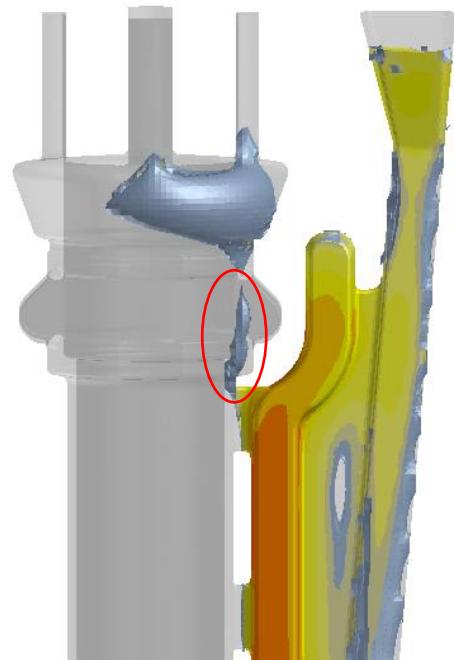
(a)



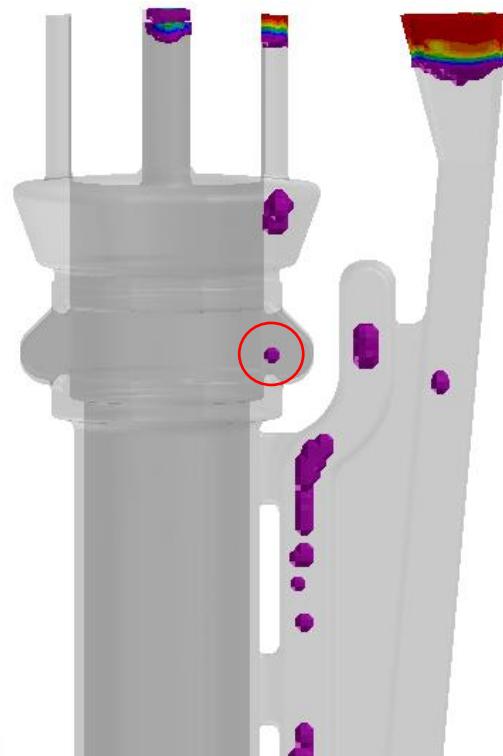
(b)

Figura 33 – (a) Isolamento de massa líquida nas costas da válvula entre os dois ataques indentificados na figura; (b) Previsão de porosidades nesta mesma região. (Fonte: software QuikCAST)

- E, em uma das hastas, na parte superior da peça, na haste mais próxima do canal de alimentação (acusada apenas na simulação e não na prática) (Figura 34).



(a)



(b)

Figura 34 – (a) Isolamento de massa líquida em uma das hastas da parte superior da peça; (b) Previsão de porosidade nesta mesma região. (Fonte: software QuikCAST)

Os resultados obtidos na prática e na simulação com relação às porosidades e as suas previsões da válvula apresentada, sem o massalote lateral, se demonstraram bem compatíveis, sendo o resultado da simulação bem próximo ao dos resultados que a fundição Vlados apresentou na sua produção.

Primeiro, com relação à parte do bocal da peça, tanto na prática quanto na simulação, temos a presença de rechupes nesta região. Pelas Figuras 26a e 26b, pode-se ver a presença de rechupes na parte inferior do bocal, como também é demonstrada pelo software (Figuras 27c e 27d).

Entretanto, pelo software, é possível observar a presença também de porosidades nas regiões laterais do bocal, que não estão presentes nas Figuras 26a e 26b. Isto ocorre, neste caso, pois na prática, a fundição Vlados, utiliza sobremetal nestas regiões laterais do bocal. Dessa forma, utiliza metal em excesso para prevenir que estes rechupes ocorram. Mesmo com o sobremetal, não é sempre que se consegue eliminar estes rechupes, sendo ainda um problema para a indústria.

Com relação à região do pino interno, observa-se que se tem porosidades no pino e nas regiões do entorno do pino, como demonstrado pelas Figuras 29a e 29b, que também são previstas pela simulação (Figura 30b).

Outra região da peça que apresenta porosidades na prática é a região das costas da peça, próxima a um dos canais, como mostrada na Figura 32. No software, apesar de não mostrar esta porosidade no local exato em que ela se encontra na prática, ele prevê porosidade também nas costas da peça, apenas deslocada um pouco mais para cima (Figura 33b). Nota-se que há algum isolamento de massa líquida próxima a esta região, podendo acarretar em algum defeito, como de fato acontece.

Há também, através da simulação, mais um local em que se tem a previsão de rechupes e porosidades: a região da haste que se encontra mais próxima do canal de alimentação, como demonstrada na Figura 34b. Todavia, na prática, não foi um local trazido como problema pela Vlados. Acredita-se que, por ser uma região onde a peça é usinada, faz-se um furo em todas as hastes (Figuras 17a e 17b), esta porosidade pode ser eliminada durante a usinagem. Por ser um

local que não traz problemas mecânicos ou estruturais à peça, essa região é menos analisada e testada e a porosidade não é detectada.

5.2. Fundição com o massalote lateral

A maioria dos resultados desta fundição tanto na prática quanto na simulação (na região do bocal, nas costas da peça e em uma das hastes superiores) foram iguais aos resultados desta mesma peça, mas sem o massalote lateral. O único resultado diferente encontrado foi observado na região onde se foi adicionado o massalote, ou seja, na região do pino interno da válvula.

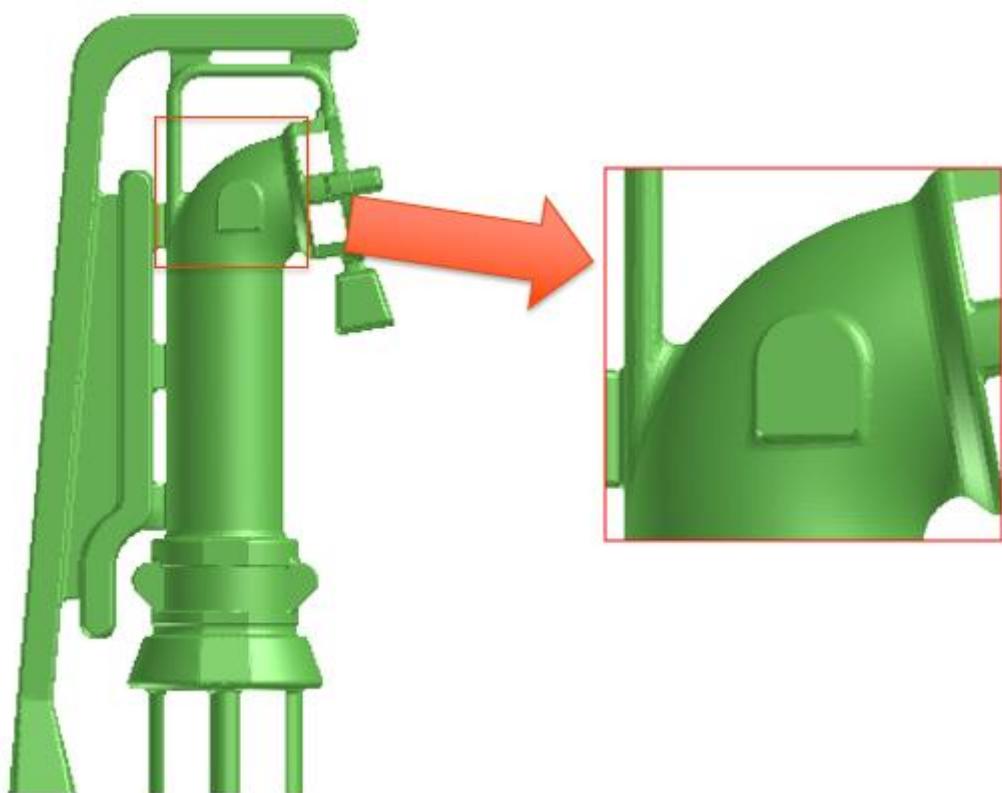
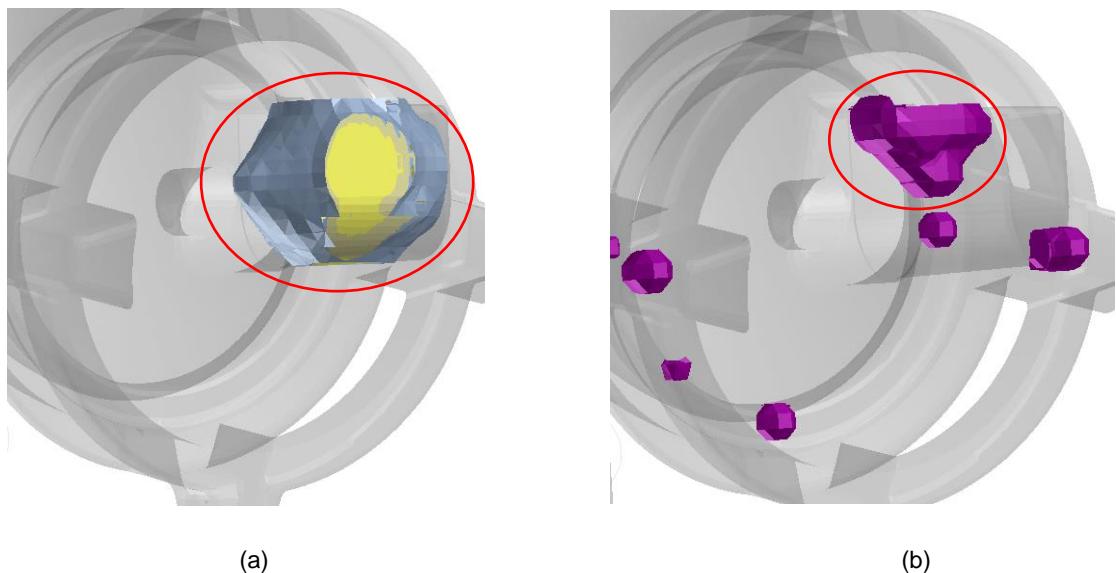


Figura 35 – Representação da região externa do pino, na interface peça/massalote lateral. (Fonte: software QuikCAST)



Figura 36 – Porosidade por contração na região da peça já usinada na interface peça/massalote lateral.
(Fonte: fundição Vlados)



(a)

(b)



(c)

Figura 37 – (a) Isolamento de massa líquida na região do pino interno com o massalote lateral; (b) Previsão de porosidade nesta mesma região com o massalote lateral; (c) Previsão de porosidade na região da válvula mais próxima do massalote, representada por um corte na interface peça/massalote (neste caso, a porosidade está sendo representado pelas cores diferentes da roxa). (Fonte: software QuikCAST)

Considerando esta região do pino interno/massalote lateral, pode-se perceber que tanto na prática (Figura 36) quanto na simulação (Figuras 37b e 37c), ainda se tem a porosidades e rechupes, mas estes estão agora deslocados para a parte externa da válvula, próximos ao massalote. Todavia, ainda se tem a presença de algumas porosidades também na parte interna da peça.

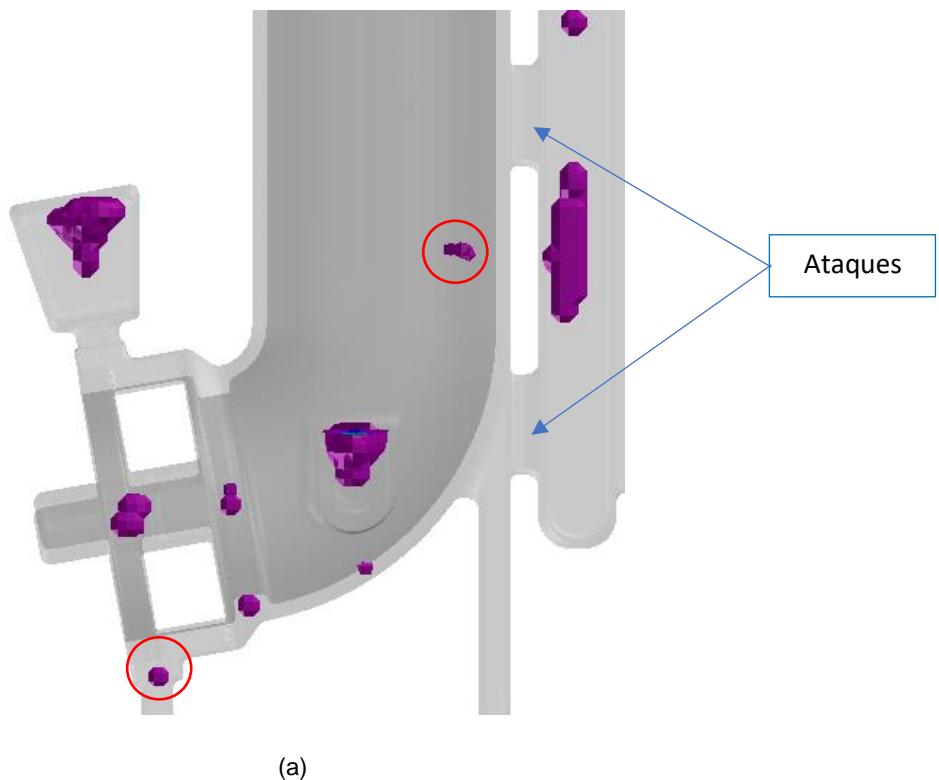
Comparando esta porosidade com a do caso anterior (sem o massalote lateral), as porosidades e rechupes ficam mais parecidos com os das Figuras 29a e 29b. Nesse caso (com o massalote lateral), a porosidade está localizada mais na parte interna da peça e há porosidades também dentro do pino interno. Então, quando o massalote lateral é utilizado, a porosidade mais recorrente é a representada pela Figura 36, mais próxima do lado de fora da válvula, junto ao massalote.

5.3. Simulação com os ataques mais espessos

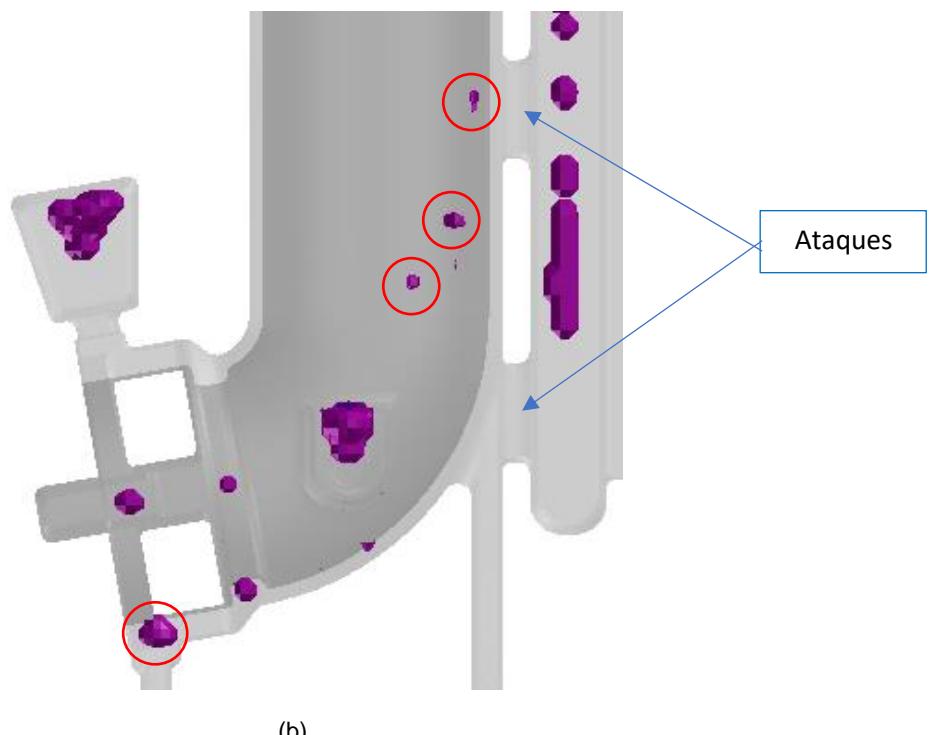
Os resultados para esta simulação extra, que apresenta os ataques mais largos e ainda não foi possível de realizar na prática, quando comparados com os resultados dos dois outros casos simulados, se mostrou com resultados também bem parecidos, com previsões de porosidades e rechupes nas mesmas regiões.

A grande diferença nos seus resultados se mostrou com relação a região próxima dos ataques centrais da peça, nas costas da válvula, no qual agora se tem a presença de um número maior de porosidades, como mostrado pela Figura 38b, em relação ao resultado das outras simulações (Figura 38a).

Pode-se notar também, pela Figura 38b, que o rechupe inferior na região do bocal mostrou um aumento no seu tamanho e volume, comparado com os outros casos, Figura 38a. Podendo então, causar uma porosidade maior do que já é apresentada na prática.



(a)



(b)

*Figura 38 – Previsão de porosidades nas costas da válvula entre os dois ataques indentificados na figura:
(a) nos dois primeiros casos de simulação e, (b) para a simulação extra, com os ataques mais largos.*

(Fonte: software QuikCAST)

Sendo assim, não se aconselha que a fundição Vlados realize este caso, com a presença dos ataques mais largos e grossos, na sua prática, pois além de não trazer nenhum benefício e melhora com relação à presença das porosidades na válvula, esta simulação extra mostra que há um aumento no número e no tamanho de alguns rechupes na peça, podendo trazer apenas um aumento na quantidade de problemas e defeitos com relação às fundições já existentes desta válvula.

Este estudo, assim como outros artigos (CARLSON, 2002; COMBEAU, 1993; KHALAJZADEH, 2020; SABAU, 2002), que visam a previsão de porosidades de peças fundidas através de modelagens matemáticas e do uso dos mais diferentes tipos de softwares e soluções, chegam sempre a bons resultados e conclusivos, mostrando que a utilização destes softwares, indiferente de qual seja, é possível e que se obtém resultados muito próximos da realidade e com uma ótima previsão comparado com sua prática.

6. Conclusão

Os resultados obtidos no presente trabalho permitem elaborar as seguintes conclusões:

- Os resultados das simulações realizadas pelo software QuikCAST sem e com o massalote lateral mostraram-se consistentes com o que se obteve na fundição Vlados.
- No caso da peça com o massalote lateral, tanto na prática como na simulação obtiveram-se resultados melhores do que na peça sem massalote, apresentando redução das porosidades na região do pino interno da válvula. Porém, mesmo a presença do massalote não eliminou completamente as porosidades no local.
- A simulação com um canal de ataque mais espesso mostrou resultados muito semelhantes aos das simulações anteriores, porém se observou um pequeno aumento da porosidade tanto na região próxima aos ataques das costas da peça como na região do bocal da válvula.
- Entre as três simulações, a saber, (1) sem massalote lateral, (2) com massalote lateral e (3) com canal de ataque mais espesso, aquela com massalote lateral mostrou a menor quantidade de porosidades.

7. Referências Bibliográficas

- [1]. JOHN, K. C. Metal Casting and Joining. *In: Metal Casting and Joining*. Cheruthuruthy, Thrissur: 2015. cap. 1.2, p. 05 - 08.
- [2]. HUNT, L. B. The Long History of Lost Wax Casting: Over five thousand years of art and craftsmanship. **Johnson Matthey & Co. Limited**, London, U.K., p. 63 – 79, 1980.
- [3]. METALÚRGICA FREMAR LTDA (São Bernardo do Campo, SP). **Fundição de Metais Não Ferrosos**. Disponível em: <http://www.fremar.com.br/fundicao-metais-nao-ferrosos.html#:~:text=As%20pe%C3%A7as%20confeccionadas%20por%20meio,ind%C3%BAstria%20moveleira%20e%20v%C3%A1rias%20outras>. Acesso em: 4 nov. 2020.
- [4]. OMIL (Ibirama, SC). **Conheça os benefícios do sistema automatizado de moldagem em areia verde**. Disponível em: <https://www.fundicaoomil.com.br/post/21/conheca-os-beneficios-do-sistema-automatizado-de-moldagem-em-areia-verde>. Acesso em: 4 nov. 2020.
- [5]. YOUSEFIAM, P.; TIRYAKIOGLU, M. Pore Formation During Solidification of Aluminum: Reconciliation of Experimental Observations, Modeling Assumptions, and Classical Nucleation Theory. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 17 dez. 2017.
- [6]. COMBEAU, H. et al. Modelling of microporosity formation in aluminium alloys castings. **Materials Science and Engineering**, p. 155 - 159, 1993.
- [7]. KHALAJZADEH, V.; BECKERMANN, C. Simulation of Shrinkage Porosity Formation During Alloy Solidification. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 51A, p. 2239 - 2254, maio 2020.
- [8]. CAMPBELL, John. The Melt. *In: Complete casting handbook*: metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Butterworth-Heinemann: 2011. cap. 1, p. 3 - 17.
- [9]. CAMPBELL, John. Solidification Structure. *In: Complete casting handbook*: metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Butterworth-Heinemann: 2011. cap. 5, p. 187 - 253.
- [10]. DANTZIG, J. A.; RAPPAZ, M. Nucleation. *In: Solidification*. Lausanne: 2009. cap. 7, p. 249 - 284.

- [11]. STEFANESCU, D. M. Nucleation and Growth Kinetics: Nanoscale Solidification. In: **Science and Engineering of Casting Solidification**. 2015. cap. 3, p. 29 - 58.
- [12]. CHALMERS, B. Principles of Solidification. In: **Applied Solid State Physics**. Jerusalem: 1968. cap. 5, p. 161 - 170.
- [13]. MORA, N. D. Defeitos Cristalinos: Poros. In: **Apostila de Materiais Elétricos**. Laboratório de Materiais - Unioeste Foz do Iguaçu: 2012. cap. 7, p. 160 - 164.
- [14]. CAMPBELL, John. Porosity. In: **Complete casting handbook**: metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Butterworth-Heinemann: 2011. cap. 7, p. 391 - 464.
- [15]. DANTZIG, J. A.; RAPPAZ, M. Porosity. In: **Solidification**. Lausanne: 2009. cap. 12, p. 479 - 517.
- [16]. STEFANESCU, D. M. Microshrinkage. In: **Science and Engineering of Casting Solidification**. 2015. cap. 12, p. 263 - 281.
- [17]. FREDIKSSON, H.; SVENSSON, I. On the Mechanism of Pore Formation in Metals. **Metallurgical Transactions B**, v. 7B, p. 599 - 606, dez. 1976.
- [18]. GUPTA, A. K. et al. Review: Pore formation in casting metals and alloys. **Journal of Materials Science**, v. 27, p. 853 - 862, 1992.
- [19]. COUPER, M. J. et al. Casting Defects and the Fatigue Behaviour of an Aluminium Casting Alloy. **Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.**, v. 13, p. 213 - 227, 1990.
- [20]. SKALLERUD, B. et al. Fatigue Life Assessment of Aluminum Alloys with Casting Defects. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 44, p. 857 - 874, 1993.
- [21]. SAMUEL, A. M.; SAMUEL, F. H. A Metallographic Study Relation to the Tensile of Porosity and Fracture Behavior in Properties in 319.2 End Chill Castings. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 26A, p. 2359 - 2372, set. 1995.
- [22]. DRENCHEV, L. et al. Mathematical modelling and numerical simulation of ordered porosity metal materials formation. **Journal of Computer-Aided Materials Design**, v. 10, p. 35 - 54, 2003.

- [23]. STEFANESCU, D. M. Computer simulation of shrinkage related defects in metal castings – a review. **International Journal of Cast Metals Research**, v. 18, p. 129 - 143, 2005.
- [24]. CARLSON, K. D. *et al.* Modeling of Porosity Formation and Feeding Flow in Steel Casting. **Steel Founders' Society of America**, Chicago, 2002.
- [25]. HENZEL, J. G.; KEVERIAN, J. The Theory And Application of a Digital Computer in Predicting Solidification Patterns. **Journal of Metal**, p. 561 - 568, maio 1965.
- [26]. KUBO, K.; PEHLKE, R. D. Mathematical Modeling of Porosity Formation in Solidification. **Metallurgical Transactions B**, v. 16B, p. 359 - 366, jun. 1985.
- [27]. LEE, P. D. *et al.* Modeling microporosity in aluminum-silicon alloys: a review. **Journal of Light Metals** 1, p. 15 - 30, 2001.
- [28]. ERDAKOV, I. N. *et al.* Analysis of Pore Formation and Impeded Shrinkage of an Alloy in the System ProCAST. **Metallurgist**, v. 58, p. 243 - 249, jul. 2014.
- [29]. SABAU, A. S.; VISWANATHAN, S. Microporosity Prediction in Aluminum Alloy Castings. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 33B, p. 243 - 255, abr. 2002.
- [30]. HWANG, J. D. *et al.* Numerical Simulation of Metal Flow and Heat Transfer during Twin Roll Strip Casting. **ISIJ Internacional**, v. 35, p. 170 - 177, 1995.
- [31]. YANGQING, D. *et al.* Reversing design methodology of investment casting die profile based on ProCAST. **China Foundry**, v. 7, p. 132 - 137, maio 2010.
- [32]. ESIGROUP. **ProCAST User's Guide**. Versão 2019.0, 2018.
- [33]. KLUS, P. *et al.* Numerical Modelling of Metallurgical Processes - Casting and Solidification of Steel. **Metal 2012**, Czech Republic, 25 maio 2012.
- [34]. FONTANA, E. **Introdução ao Método de Diferenças Finitas com Aplicações em Engenharia Química**. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná – UFPR, 2019.
- [35]. NEPOMUCENO, E. G. **Método dos Elementos Finitos**. Universidade de São João Del-Rei, 2016.

- [36]. OLIVEIRA, D. C. P. M. **Utilização do software ProCast no projecto de alimentação e gitagem de uma peça de aço vazado**. 2009. Tese (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.
- [37]. ALUMIZA INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE METAIS LTDA (Cachoeirinha, RS). **Alumínio:** SAE 323. 2019. Disponível em: <https://www.alumiza.com.br/aluminio>. Acesso em: 3 out. 2020.
- [38]. AÇO ESPECIAL (São Paulo, SP). **Aço AISI 1045**. Disponível em: <https://www.acoespecial.com.br/aco-aisi-1045>. Acesso em: 3 out. 2020.
- [39]. COELHO, R. A. M.; TREIN, F. A. **Processo de Fundição por Gravidade para Cilindros em Alumínio**. 2006. Artigo (Curso de Formação Específica Gestão da Produção) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-riograndense, 2006.