



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**METODOLOGIA DE ANÁLISE DE REOXIDAÇÃO POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA
EM COMPONENTES FUNDIDOS POR GRAVIDADE**

NILO FÜCHTER JUNIOR

**Criciúma/SC
2021**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SATC - UNISATC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

NILO FÜCHTER JUNIOR

**METODOLOGIA DE ANÁLISE DE REOXIDAÇÃO POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA
EM COMPONENTES FUNDIDOS POR GRAVIDADE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação
Mestrado Profissional em Engenharia Metalúrgica da
SATC, como requisito parcial para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

**Criciúma/SC
2021**

CENTRO UNIVERSITÁRIO SATC - UNISATC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA METALÚRGICA

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, área de concentração Fundição e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

METODOLOGIA DE ANÁLISE DE REOXIDAÇÃO POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA
EM COMPONENTES FUNDIDOS POR GRAVIDADE

NILO FÜCHTER JUNIOR

Como requisito para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Metalúrgica

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Daniel Fritzen, Dr. - UNISATC

Avaliador: Prof. Alexandre Milanez, Dr. - UNISATC

Avaliador: Prof. Jovani Castelan, Dr. - UNISATC

Avaliador: Dr. Reinaldo José de Oliveira – MAGMA Engenharia do Brasil Ltda.

Suplente:

Avaliador: Prof. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler, Dr. - UNISATC

Criciúma, SC
2021

*Dedico à família e amigos, por todo apoio,
paciência e motivação.*

AGRADECIMENTOS

À Deus por concluir este trabalho.

A minha família e amigos pelo apoio incondicional, motivação e compreensão das ausências necessárias.

À MAGMA Engenharia do Brasil Ltda. e todos seus colaboradores pelo usual e cordial apoio, não medindo esforços na avaliação de resultados e transmitindo conhecimento técnico.

Agradeço a empresa Usipe Fundidos e Usinados por acreditar no desenvolvimento técnico constante, disponibilizando os recursos necessários para a execução do processo de fundição, tratamento térmico e usinagem.

À UniSATC, pela disponibilidade de equipamentos e ferramentas para execução dos experimentos práticos da dissertação.

A todos os colegas da UniSATC que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao amigo Prof. Dr. Anderson Daleffe viabilizando mão-de-obra e recursos necessários junto a SATC, não medindo esforços para realização dos ensaios e também ao incentivo constante para o desenvolvimento do estudo.

Finalmente, ao amigo e orientador Prof. Dr. Daniel Fritzen, por sua valiosa orientação, estímulo, informações técnicas e metodologias repassadas, meu sincero agradecimento.

“Nada é difícil se for dividido em pequenas partes” (Henry Ford).

RESUMO

Inclusões de reoxidação estão entre os defeitos mais comumente relatados no processo de fundição, defeitos esses que afetam a qualidade superficial, a usinabilidade e o desempenho mecânico do componente final. A indústria de fundição suporta um alto percentual de produtos manufaturados, com mercado em expansão devido sua flexibilidade no desenvolvimento de componentes. Sistemas de enchimento que apresentem turbulência fazem com que o metal líquido reaja com o oxigênio e demais materiais com que entra em contato, causando diferentes tipos de defeitos. A fundamentação teórica objetiva a compreensão dos mecanismos de formação de reoxidação, com conceitos atuais, bem como análises realizadas através da tecnologia de SNPFM (Simulação Numérica do Processo de Fundição de Metais), demonstrando sua aplicabilidade e relevância dentro da indústria no desenvolvimento de produtos fundidos. Visando o desenvolvimento técnico científico, uma metodologia de análise de reoxidação utilizando a tecnologia de SNPFM foi desenvolvida, por meio de um estudo realizado no *software* MAGMASOFT[®], comparando diferentes sistemas de enchimento, possíveis de serem realizados com a utilização de geometrias disponíveis em manilhas refratárias, sendo os dados plotados em valores adimensionais de superfície de metal exposta ao ar, separados em VOF – Canais e VOF – Peça (para análise detalhada) e posteriormente somados (VOF – Total) e aprisionamento de ar [%], ambos correlacionados com a velocidade média [m/s] do metal no preenchimento do molde. Adicionalmente, foi utilizado o módulo específico MAGMAsteel[®] para avaliação das inclusões de reoxidação pelos resultados de inclusão por área [%] e inclusão por volume [%]. Após análises pela metodologia proposta foram definidos 4 (quatro) corpos de prova, com resultados extremos (melhor e pior) e espaçados, usando os resultados obtidos por SNPFM, a fim de validar resultados obtidos, melhor compreendê-los e correlacioná-los. Os quantitativos de inclusões observadas nas faces após a usinagem dos corpos de prova selecionados para prática de fundição mostraram correlação com os dados obtidos pelo processo de simulação. As metalografias realizadas demonstraram contaminações em quantidade e tamanho diferentes para os corpos de prova em prática de fundição, congruentes com os resultados obtidos por simulação numérica. Os resultados obtidos pela realização dos ensaios mecânicos mostraram baixa variação percentual, dando a entender que as inclusões observadas na estrutura do material competiram com a matriz metálica como iniciadores ou agravantes da degeneração das propriedades mecânicas para o material G42CrMo4. Realizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscópio por energia dispersiva (EDS) foi observado que as inclusões foram oriundas do processo de reoxidação do metal líquido por conterem altos percentuais de oxigênio (O).

Palavras-chave: Tecnologia SNPFM, simulação numérica, fundição por gravidade, sistemas de enchimento, reoxidação, inclusões de reoxidação, aprisionamento de ar.

ABSTRACT

Reoxidation inclusions are considered the most commonly reported defects in the casting process, defects that affect the surface quality, machinability, and mechanical performance of the final component. The foundry industry supports a high percentage of manufactured products, with a growing market due to its flexibility in component development. Filling systems that present turbulence cause the liquid metal to react with oxygen and other materials it comes in contact with, causing different types of defects. The theoretical foundation aims to understand the mechanisms of reoxidation formation, with current concepts, as well as analyses performed through the NSMCP (Numerical Simulation of the Metal Casting Process) technology, demonstrating its applicability and relevance within the industry in the development of cast products. Aiming at the scientific technical development, a methodology for reoxidation analysis using the NSMCP technology was developed, through a study performed in MAGMASOFT[®] software, comparing different filling systems, possible to be realized with the use of available geometries in refractory shells, The data were plotted in dimensionless values of metal surface exposed to air, separated in VOF – Runners and VOF - Casting (for detailed analysis) and later summed (VOF - Total) and air entrapment [%], both correlated with the average velocity [m/s] of the metal in the mold filling. Additionally, the specific module MAGMAsteel[®] was used to evaluate the reoxidation inclusions by the results of inclusion per area [%] and inclusion per volume [%]. After analysis by the proposed methodology, 4 (four) specimens were defined, with extreme results (best and worst) and spaced, using the results obtained by NSMCP, in order to validate results obtained, better understand them and correlate them. The quantitative inclusions observed on the faces after machining of the specimens selected for casting practice showed high correlation with the data obtained by the simulation process. The metallographies performed showed contaminations in different amounts and sizes for the specimens in casting practice, congruent with the results obtained by numerical simulation. The results obtained by performing the mechanical tests showed low percentage variation, suggesting that the inclusions observed in the material structure competed with the metal matrix as initiators or aggravators of the degeneration of mechanical properties for the G42CrMo4 material. Performed scanning electron microscopy (SEM) with energy dispersive spectroscopy (EDS) it was observed that the inclusions came from the reoxidation process of the liquid metal as they contained high percentages of oxygen (O).

Palavras-chave: NSMCP Technology, numerical simulation, gravity casting, pouring systems, reoxidation, reoxidation inclusions, air entrapment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de pesquisa e experimento dos estudos da Dissertação de Mestrado..	24
Figura 2 – Processo de fundição com panela tipo válvula (a) esquema típico [15] e (b) Configuração experimental [18].....	26
Figura 3 – Bolhas de ar arrastadas em tanque de água para única configuração em diferentes tempos (a) tempo de enchimento igual a 0 (zero) segundos, (b) tempo de enchimento igual a 0,5 segundos e (c) tempo de enchimento em 8,0 segundos [5]	27
Figura 4 – Efeito pressão hidrostática sobre a variação da taxa relativa de entrada de ar pela quantidade de metal líquido para a válvula aberta (a) panela com 100% da capacidade (b) panela com 50% da capacidade (c) taxa relativa de arraste de ar (Q_a/Q_s) pelo tempo de enchimento.	28
Figura 5 – Efeito da abertura do bocal na variação da taxa relativa de entrada de água (Q_w) [5]	28
Figura 6 - Sistemas de canais por gravidade e contra gravidade (baixa pressão) [19].....	29
Figura 7 - Inclusão de óxidos em peças fundidas em aço contendo 34% de Al_2O_3 , 46% de SiO_2 e 20% MnO [28].....	31
Figura 8 – Estimativa de escala de comprimento de superfície livre em salto, adaptado de [32].	32
Figura 9 - Bolhas de ar perto de um mergulho de um jato de água líquido, reproduzido a partir de "Mecanismos de atrito do ar em jatos – (<i>Breaking Waves</i>)" [34].....	32
Figura 10 – Exemplos de inclusões de reoxidação na superfície de peças fundidas em aço (a) superfície com defeito (b) detalhe da inclusão (aproximado) [23].....	33
Figura 11 - Inclusões de óxidos em peças de aço fundido, contendo SiO_2 e Al_2O_3 - [37].....	33
Figura 12 – Inclusões superficiais em peças de aço (a) produto final com inclusões superficiais e (b) detalhe característico das inclusões [2]	34
Figura 13 – Análise MEV (a) indicação dos pontos analisados e (b) resultado do ponto 1 (um) [2]	34
Figura 14 – Defeito correlacionado a bi-filmes (a) fissuras em linha na superfície da peça fundida, revelado por líquido penetrante fluorescente e (b) seção vertical da fissura superficial (aumento 100x) [33]	35
Figura 15 – Formação de bi-filme durante a turbulência superficial do aço líquido [15].....	36
Figura 16 - Esboço de uma onda quebrando [39].....	36
Figura 17 - Uma bolha, soltando sua pele de óxido como uma trilha [3]	37

Figura 18 – Cristais de sal (NaCl) com tamanho de 0,5 – 1,0 mm, suspenso no ar com densidade numérica de aproximadamente 10cm^3 . a) imediatamente após agitação e b) mesmo experimentos alguns segundos após a agitação [46]	38
Figura 19 – Local de iniciação de trinca pela aglomeração de inclusões em ensaio de fadiga (a) ampliação baixa e (b) ampliação alta [47].....	38
Figura 20 – Fratura da liga à base de Ni CY40 (a) dendritas revestidas por bi-filmes na superfície fraturada e (b) detalhe dos detritos de óxido na superfície do bi-filme [15].	39
Figura 21 - Velocidades de enchimento (a) velocidade igual a zero (b) velocidade crítica (0,5 m/s) (c) velocidade alta, acima da velocidade crítica [19]	41
Figura 22 – Variação do tempo de enchimento no preenchimento da cavidade do molde (a) tempo de enchimento 50,8 segundos e $Q_s = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, (b) tempo de enchimento 25,4 segundos e $Q_s = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, (c) tempo de enchimento 16,9 segundos e $Q_s = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e (d) tempo de enchimento 12,7 segundos e $Q_s = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ [35].....	42
Figura 23 – Gráficos demonstrando o efeito do tempo de enchimento em (a) Q_a/Q_s em função do tempo e (b) V_a/V_s para os tempos de enchimento [35]	42
Figura 24 – Alteração do diâmetro da válvula de vazamento (a) diâmetro do bico 25,4 mm, (b) 31,75 mm, (c) 63,5 mm e (d) 76,2 mm [35].....	43
Figura 25 - Gráficos demonstrando o efeito do diâmetro do fluxo de vazamento (a) Q_a/Q_s em função do tempo e (b) V_a/V_s para os diâmetros de 25,4 mm à 76,2 mm [35].....	43
Figura 26 – Avaliação automática e quantitativa de diferentes projetos de sistema de enchimento relacionados a qualidade da superfície [25].....	45
Figura 27 – Análise da superfície livre durante o processo de enchimento [60].....	46
Figura 28 - Taxa de arraste de ar calculada em função do espaçamento da rede para um jato de água em mergulho [61].....	46
Figura 29 - Resultado de velocidade do MAGMASOFT® em corpos de prova com diferentes pontos de ataque (a) ataque lateral inferior, (b) ataque lateral intermediário, (c) ataque lateral superior e (d) gráfico comparativo da taxa de arraste volumétrico de ar no aço (Q_a/Q_s) em função do tempo [18]	48
Figura 30 – Fundição de tubos em ferro fundido nodular com partição vertical (a) simulação numérica e (b) acabamento superficial resultante em prática de fundição [23]	49
Figura 31 - Geometria da bacia de despejo: (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista superior [61]	49
Figura 32 – Comparativo entre funil de vazamento tipo cone e bacia de vazamento (a) funil de vazamento com impacto lateral, (b) funil de vazamento com impacto de fundo, (c) bacia de	

vazamento, (d) taxa de arraste volumétrico de ar no aço para o sistema pressurizado (e) taxa de arraste volumétrico de ar no aço para o sistema não pressurizado e (f) volumes totais previstos de arraste de ar para as configurações estudadas [61]	50
Figura 33 – Inclusões de reoxidação encontradas em uma bacia de vazamento (a) vista lateral e (b) vista frontal [2].....	51
Figura 34 - Diferentes tipos de sistemas de vazamento (a) inclinado, (b) parabólico, (c) hiperbólico e (d) cônico helicoidal [50]	52
Figura 35 – Sistema de enchimento tubular com ataque pelo fundo com acompanhamento do tempo de enchimento após (a) 1 (um) segundo, (b) 2 (dois) segundos e (c) 4 (quatro) segundos [9]	53
Figura 36 - Corpos de prova (a) canal direto; (b) canal parabólico; (c) canal cônico helicoidal	54
Figura 37 – Comparação da fração do volume de ar arrastado (a) medida por um ponto de controle em um local idêntico para todas os 3 (três) distintos sistemas de enchimento e (b) análise gráfica de fração volumétrica e arraste de ar em função do tempo para os diferentes sistemas estudados [50]	54
Figura 38 - Localização de quatro corpos de prova (60x12x4,25 mm) e uma amostra para realização da microestrutura SEM/EDS [50]	55
Figura 39 – Análise de inclusões oriundas de diferentes sistemas de canais (a) canal reto, (b) canal parabólico, (c) canal cônico helicoidal e (d) comparação percentual de inclusões sobre a área da microestrutura [50].....	56
Figura 40 – Resistência à flexão para diferentes sistemas de enchimento [50]	56
Figura 41 – Diferentes sistemas de enchimento (a) sistema A, (b) sistema B, (c) sistema C e (d) taxa de arraste volumétrica de ar no aço [18].....	57
Figura 42 – Superfície após usinagem de 2,5 milímetros de profundidade (a) sistema A, (b) sistema B e (c) sistema C [18].....	57
Figura 43 – Resultados de inclusão (a) enchimento parcial e (b) enchimento completo [4] ...	58
Figura 44 – Distribuição de inclusões medidas e previstas (a) gráfico de probabilidade de inclusão experimental, (b) resultado da simulação da fração de área de inclusão usando aglomeração de 5mm e (c) utilizando aglomeração de 10 mm [4]	58
Figura 45 – Simulação do processo de fundição (a) vista isométrica e (b) vista superior dos locais finais de inclusão [67].	59
Figura 46 – Comparação entre simulação e resultados experimentais, vista superior dos locais finais de inclusão em prática de fundição após usinagem [67]	59

Figura 47 – Microestrutura do aço G42CrMo4, martensita temperada.....	61
Figura 48 – Viscosidade em função da temperatura para o material G42CrMo4 (MAGMASOFT®).....	61
Figura 49 – Micrografia do aço G42CrMo4 (1.7231) (a) inclusões aglomeradas de alumina e (b) detalhe da aglomeração na região demarcada [69].....	62
Figura 50 – Detalhe de fratura em ensaios (a) detalhe superficial da fratura e (b) inclusões observadas na fratura [69].....	63
Figura 51 – Aglomerados de inclusão (a) aço G42CrMo4 composição A e (b) aço G42CrMo4 composição B [70].....	63
Figura 52 - Corpo de prova (a) vista lateral e (b) vista superior. Adaptado de Majidi [18].....	66
Figura 53 - Velocidade do MAGMASOFT® (a) ataque lateral inferior, CP01, (b) ataque lateral intermediário, CP02 e (c) ataque lateral superior, CP03.....	66
Figura 54 - Dimensionamento do corpo de prova (a) vista frontal e (b) vista lateral.....	69
Figura 55 - Análise de malha do MAGMASOFT® com dimensionamento de 5 milímetros de aresta (a) vista isométrica, (b) detalhe região dos canais em corte.....	70
Figura 56 – Viscosidade em função da temperatura para o material G40NiCrMo4 (MAGMASOFT®).....	71
Figura 57 - Características da panela utilizada para simulações e prática de fundição.....	72
Figura 58 - Taxa de vazão projetada para prática de fundição de acordo com as características da panela.....	73
Figura 59 – Detalhamento do projeto de fundição no software MAGMASOFT®.....	74
Figura 60 - Velocidade do MAGMASOFT® em 25% de enchimento para geração 01 (a) CP04, (b) CP05, (c) CP06 e (d) CP07.....	75
Figura 61 - Velocidade do MAGMASOFT® em 25% de enchimento para geração 02 (a) CP04, (b) CP08, (c) CP09 e (d) CP10.....	76
Figura 62 – Velocidade do MAGMASOFT® em 25% de enchimento para geração 03 (a) CP11, (b) CP12, (c) CP13 e (d) CP14.....	77
Figura 63 - Velocidade do MAGMASOFT® em 25% de enchimento para geração 04 (a) CP15, (b) CP16, (c) CP17 e (d) CP18.....	77
Figura 64 – Velocidade do MAGMASOFT® em 25% de enchimento para geração 05 (a) CP19, (b) CP20, (c) CP21 e (d) CP22.....	78
Figura 65 - Ferramental de fundição.....	80
Figura 66 – Processo de moldagem do corpo de prova 14 – CP14 (a) lado do fundo (invertido) e (b) lado da tampa.....	81

Figura 67 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova (a) corpo de prova 12 – CP12, (b) corpo de prova 21 – CP21 e (c) corpo de prova 08 – CP08	82
Figura 68 – Corpos de prova após jateamento (a) CP14, (b) CP12, (c) CP21 e (d) CP08.....	84
Figura 69 – Limpeza das faces e identificação dos corpos de prova para ensaio de líquido penetrante.....	86
Figura 70 – Aplicação do penetrante no processo de ensaio	86
Figura 71 – Identificação dos corpos de prova para ensaio mecânico	88
Figura 72 – Disposição dos corpos de prova nas placas fundidas.....	88
Figura 73 – Dimensionamento do corpo de prova para o ensaio mecânico de tração – Adptado da Norma ASTM E8/E8M.....	90
Figura 74 - Dimensionamento do corpo de prova para o ensaio mecânico de impacto (charpy) – adaptado da norma ASTM E23	91
Figura 75 – Aprisionamento de ar do MAGMASOFT® (a) ataque lateral inferior, CP01, (b) ataque lateral intermediário, CP02 e (c) ataque lateral superior, CP03.....	92
Figura 76 - Módulo térmico (a) vista frontal em corte e (b) vista lateral em corte	94
Figura 77 - Porosidade (a) vista frontal em corte e (b) vista lateral em corte	95
Figura 78 - Microporosidade (a) vista frontal em corte e (b) vista lateral em corte.....	96
Figura 79 - Aprisionamento de ar do MAGMASOFT® (a) CP04, (b) CP05, (c) CP06 e (d) CP07	98
Figura 80 - Diâmetro, localização e aglomeração de inclusões de reoxidação do MAGMAsteel® (a) CP04, (b) CP05, (c) CP06 e (d) CP07.....	100
Figura 81 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP04 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	101
Figura 82 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP05 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	101
Figura 83 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP06 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	102
Figura 84 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP07 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	102
Figura 85 - Aprisionamento de ar do MAGMASOFT® (a) CP04, (b) CP08, (c) CP09 e (d) CP10	104
Figura 86 - Diâmetro, localização e aglomeração de inclusões de reoxidação do MAGMAsteel® (a) CP04, (b) CP08, (c) CP09 e (d) CP10.....	106

Figura 87 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP08 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	106
Figura 88 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP09 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	107
Figura 89 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP10 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	107
Figura 90 - Aprisionamento de ar do MAGMASOFT® (a) CP11, (b) CP12, (c) CP13 e (d) CP14	109
Figura 91 - Diâmetro, localização e aglomeração de inclusões de reoxidação do MAGMAsteel® (a) CP11, (b) CP12, (c) CP13 e (d) CP14.....	111
Figura 92 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP11 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	112
Figura 93 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP12 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	112
Figura 94 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP13 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	113
Figura 95 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP14 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	113
Figura 96 - Aprisionamento de ar do MAGMASOFT® (a) CP15, (b) CP16, (c) CP17 e (d) CP18	115
Figura 97 - - Diâmetro, localização e aglomeração de inclusões de reoxidação do MAGMAsteel® (a) CP15, (b) CP16, (c) CP17 e (d) CP18	117
Figura 98 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o corpo de prova 15 - CP15 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira	117
Figura 99 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP16 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	118
Figura 100 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP17 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	118
Figura 101 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP18 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	119
Figura 102 - Aprisionamento de ar do MAGMASOFT® (a) CP19, (b) CP20, (c) CP21 e (d) CP22	120
Figura 103 - Diâmetro, localização e aglomeração de inclusões de reoxidação do MAGMAsteel® (a) CP19, (b) CP20, (c) CP21 e (d) CP22	122

Figura 104 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP19 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	122
Figura 105 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP20 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	123
Figura 106 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP21 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	123
Figura 107 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP22 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira.....	124
Figura 108 – Indicações superficiais do CP14 (a) face frontal e (b) face traseira.....	130
Figura 109 – Indicações superficiais do CP12 (a) face frontal e (b) face traseira.....	131
Figura 110 – Indicações superficiais do CP21 (a) face frontal e (b) face traseira.....	131
Figura 111 – Indicações superficiais do CP08 (a) face frontal e (b) face traseira.....	132
Figura 112 – Análise de inclusões.....	137
Figura 113 – Detalhe da inclusão por microscópio digital.....	138
Figura 114 – Detalhe de inclusão arredondada com ligação direta a uma fissura linha.....	139
Figura 115 – Metalografias com ampliação de 12x (a) CP14, (b) CP12, (c) CP21 e (d) CP08.	140
Figura 116 - Metalografias com ampliação de 50x (a) CP14, (b) CP12, (c) CP21 e (d) CP08.	141
Figura 117 - Metalografias com ampliação de 50x (a) CP14, (b) CP12, (c) CP21 e (d) CP08.	142
Figura 118 – Região analisada com mapeamento de oxigênio na região de fratura para o CP14	147
Figura 119 – Concentração de elementos referente a inclusão observada na região da fratura referente ao CP14	147
Figura 120 – Região analisada com mapeamento de oxigênio na região mapeada referente ao corpo de prova 14 (CP14).....	148
Figura 121 - Concentração de elementos referente a inclusão 01 observada na região da fratura referente ao corpo de prova 08 (CP08).....	149
Figura 122 - Concentração de elementos referente a inclusão 02 observada na região da fratura referente ao corpo de prova 08 (CP08).....	149

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Análise gráfica – Etapa 01 - Estudo comparativo entre metodologias.....	93
Gráfico 2 - Dependência de malha - Resultado de VOF - Canais x Tempo de Simulação	97
Gráfico 3 - Análise gráfica – Etapa 01 - Resultados MAGMASOFT® – Geração 01	98
Gráfico 4 – Análise gráfica – Etapa 02 - Resultados MAGMAsteel® – Geração 01	103
Gráfico 5 - Análise gráfica – Etapa 01 - Resultados MAGMASOFT® – Geração 02	104
Gráfico 6 - Análise gráfica – Etapa 02 - Resultados MAGMAsteel® – Geração 02.....	108
Gráfico 7 - Análise gráfica – Etapa 01 - Resultados MAGMASOFT® – Geração 03	109
Gráfico 8 - Análise gráfica – Etapa 02 - Resultados MAGMAsteel® – Geração 03.....	114
Gráfico 9 - Análise gráfica – Etapa 01 - Resultados MAGMASOFT® – Geração 04	116
Gráfico 10 - Análise gráfica – Etapa 02 - Resultados MAGMAsteel® – Geração 04.....	119
Gráfico 11 - Análise gráfica – Etapa 01 - Resultados MAGMASOFT® – Geração 05	121
Gráfico 12 - Análise gráfica – Etapa 02 - Resultados MAGMAsteel® – Geração 05.....	124
Gráfico 13 - Análise gráfica – Etapa 01 - Resultados MAGMASOFT® - Geração 01 a 05 ..	125
Gráfico 14 - Análise gráfica – Etapa 02 - Resultados MAGMAsteel® – Geração 01 a 05	126
Gráfico 15 - Análise gráfica – Resultados selecionados para prática de fundição – Etp. 01 .	128
Gráfico 16 - Análise gráfica – Resultados selecionados para prática de fundição – Etp. 02 .	129
Gráfico 17 – Quantidade de indicações por corpo de prova.....	133
Gráfico 18 – Quantidade de indicações pelo VOF – Total [-].....	133
Gráfico 19 – Quantidade de indicações pelo Aprisionamento de ar [%]	134
Gráfico 20 - Quantidade de indicações pela Velocidade [m/s]	135
Gráfico 21 – Quantidade de indicações pela inclusão por área [%]	135
Gráfico 22 – Quantidade de indicações pela inclusão por volume [%].....	136
Gráfico 23 - Análise da Tensão de Escoamento [MPa] – Amostra 02.....	143
Gráfico 24 - Limite de Resistência [MPa] – Amostra 02	143
Gráfico 25 - Alongamento [%] – Amostra 02	144
Gráfico 26 - Estricção [%] – Amostra 02	145
Gráfico 27 - Energia [J] – Ensaio de Impacto (Charpy).....	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço G42CrMo4 (1.7231)	60
Tabela 2 - Tratamento térmico para o aço baixa liga G42CrMo4 (1.7231)	60
Tabela 3 - Composição química do aço baixa liga de alta resistência G40NiCrMo4	71
Tabela 4 - Dimensões para ensaio mecânico de tração norma E8 - Amostra padrão.....	90
Tabela 5 – Resultados tabelados da etapa 01 para as 05 gerações	127
Tabela 6 - Composição química G42CrMo4 (1.7231).....	139

LISTA DE ABREVIATURAS

SNPFM	Simulação Numérica do Processo de Fundição de Metais
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> (Engenharia Assistido por Computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Manufatura Assistida por Computador)
MEF	<i>Método do Elementos Finitos</i>
MVF	<i>Método do Volumes Finitos</i>
CP	Corpo de Prova
3DSP	<i>3D Sand Printing</i> (impressão 3D em areia)
MEV	Microscopia Eletrônico de Varredura
EDS	Espectroscópio por Energia Dispersiva

LISTA DE SÍMBOLOS

H	Distância metal líquido oriundo da válvula até o molde/impacto [mm];
h_l	Altura do metal líquido na panela de vazamento (pressão hidrostática) [mm];
h_j	Altura do líquido já no recipiente [mm];
D	Diâmetro inferior da panela de vazamento [mm];
d_{inc}	Diâmetro da inclusão [mm];
α	Ângulo de inclinação da panela [°];
β	Ângulo entre a superfície livre e o horizonte no impacto da água [°];
θ	Ângulo entre o jato que mergulha e a superfície livre da água [°];
Q	Vazão volumétrica [m ³ /s];
Q_a	Vazão volumétrica de ar [m ³ /s];
Q_s	Vazão volumétrica de aço [m ³ /s];
Q_w	Vazão volumétrica de água [m ³ /s];
V	Volume [m ³];
V_s	Volume de metal [m ³];
V_a	Volume de ar [m ³];
V_{inc}	Volume de inclusões [cm ³];
T	Tempo [s];
$t_{enchimento}$	Tempo de enchimento [s];
d_j	Diâmetro do jato líquido no impacto [mm];
u_j	Velocidade do metal líquido no impacto [m/s];
T	Temperatura [°C];
C_{ent}	Constante de arraste [-];

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE GRÁFICOS.....	15
LISTA DE TABELAS	16
LISTA DE ABREVIATURAS.....	17
LISTA DE SÍMBOLOS	18
SUMÁRIO.....	19
1 INTRODUÇÃO.....	22
1.1 OBJETIVO	23
1.2 FLUXOGRAMA DA PESQUISA	23
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
2.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO	25
2.1.1 Processo de fusão	25
2.1.1.1 Panela de válvula.....	26
2.1.2 Fundição por gravidade.....	29
2.2 DEFEITOS DE FUNDIÇÃO.....	30
2.2.1 Inclusões.....	30
2.2.2 Oxidação.....	31
2.2.3 Reoxidação.....	31
2.2.4 Bi-filmes.....	35
2.2.5 Bolhas de ar.....	37
2.2.6 Fragilização das propriedades mecânicas por reoxidação.....	37
2.3 PROJETOS DE FUNDIÇÃO – SISTEMAS DE ENCHIMENTO	40
2.3.1 Velocidade crítica.....	40
2.3.2 Tempo de enchimento	41
2.3.3 Taxas de vazão	43
2.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE METAIS	44
2.4.1 Dependência de malha	46
2.4.2 Análise do ponto de ataque	47
2.4.3 Bacia de vazamento.....	49
2.4.4 Canais de descida	51

2.4.5	Sistemas tubulares	52
2.4.6	Sistemas helicoidais	53
2.4.7	Comparativo superficial entre simulação e prática	56
2.4.8	Caraterísticas do aço baixa liga de alta resistência G42CrMo4 (1.7231)	60
3	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	64
3.1	PARAMETRIZAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE.....	65
3.2	DIMENSIONAMENTO DO CORPO DE PROVA.....	69
3.3	SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO POR SNPFM.....	70
3.4	DEPENDÊNCIA DE MALHA.....	70
3.5	SELEÇÃO DO MATERIAL PARA SNPFM	71
3.6	TEMPO DE ENCHIMENTO E ANÁLISE DE VAZÃO	72
3.7	CONFIGURAÇÃO DO PROJETO DE FUNDIÇÃO	74
3.8	ANÁLISE SNPFM DA APLICAÇÃO DE MANILHAS REFRAATÁRIAS TIPO COTOVELO OU CURVA.....	75
3.9	ANÁLISE DE SISTEMAS DE ENCHIMENTO POR SNPFM	76
3.10	DEFINIÇÃO DOS PROJETOS PARA ANÁLISE PRÁTICA DE FUNDIÇÃO.....	78
3.11	FERRAMENTAL DE FUNDIÇÃO	79
3.12	PROCESSO DE FUNDIÇÃO	80
3.12.1	Moldagem.....	81
3.12.2	Pintura	82
3.12.3	Fechamento	82
3.12.4	Aciaria	82
3.12.5	Jateamento.....	83
3.12.6	Tratamento térmico	84
3.12.6.1	Normalização.....	84
3.12.6.2	Têmpera.....	85
3.12.6.3	Revenimento.....	85
3.13	PROCESSO DE USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA	85
3.14	ENSAIOS DE LÍQUIDO PENETRANTE.....	86
3.15	ENSAIOS DESTRUTIVOS	87
3.16	CORTE DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO MECÂNICO	88
3.17	ANÁLISE QUÍMICA	89
3.18	ENSAIO METALOGRÁFICO.....	89
3.19	ENSAIO DE TRAÇÃO	89

3.20	ENSAIO DE IMPACTO (CHARPY).....	91
3.21	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	91
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	92
4.1	VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE	92
4.2	CORPO DE PROVA	94
4.3	DEPENDÊNCIA DE MALHA.....	96
4.4	ANÁLISE DE SNPFM	97
4.5	DEFINIÇÃO DOS PROJETOS PARA ANÁLISE PRÁTICA DE FUNDIÇÃO.....	125
4.6	ANÁLISE VISUAL DA SUPERFÍCIE.....	129
4.7	ANÁLISE POR MICROSCÓPIO DIGITAL	137
4.8	ANÁLISE QUÍMICA	139
4.9	ENSAIO METALOGRÁFICO.....	140
4.10	ENSAIO DE TRAÇÃO	142
4.11	ENSAIO DE IMPACTO (CHARPY).....	145
4.12	ANÁLISE DE FRATURA (MEV)	146
5	CONCLUSÕES	150
6	REFERÊNCIAS	152

1 INTRODUÇÃO

A indústria de fundição de metal suporta cerca de 90% do total de produtos manufaturados e espera-se que atinja um tamanho de mercado de até 40 bilhões de dólares até 2025. A fundição em areia é o processo de fundição com maior disseminação, com limitações no controle do projeto em sistemas de alimentação apresenta taxas altas de refugo [1].

Estudos da SFSA (*Steel Founder's Society of America*) em 1987 (análise de 350 amostras) e validados por Marquardt [2], sobre a origem de macro-inclusões em peças de aço fundido demonstraram que 83% dos defeitos de fundição são oriundos de reoxidação, 14% material do molde, 2% escória e 1% de desoxidação.

Inclusões de óxidos estão entre os defeitos mais comumente relatados que podem causar rejeição, afetando a qualidade da superfície, a resistência a fadiga, à tenacidade à fratura e a usinabilidade, conseqüentemente o desempenho mecânico do componente final [3, 4].

Inclusões de reoxidação ocorrem quando o aço desoxidado entra em contato com o oxigênio durante o preenchimento do molde. Portanto, limitar a exposição do aço ao oxigênio é necessário para minimizar inclusões de reoxidação [5].

Sistemas de enchimento são produzidos para reduzir a turbulência oriunda do processo, visando reduzir filmes de óxido, retenção de ar, bolhas e outros defeitos de fundição além de melhor rendimento metálico [1].

Como ferramenta de engenharia, a simulação numérica, valendo-se da evolução computacional, tem sido utilizada como suporte a tomada de decisão nas indústrias de manufatura [6]. A simulação provê uma base importante de informação para tomada de decisão em relação à execução dos projetos dos ferramentais para fabricação de peças fundidas [7].

A indústria de fundição de metais tem procurado balancear as necessidades técnicas e comerciais. Os requisitos técnicos e a amplitude de responsabilidades impostas às fundições de metais têm-se tornado cada vez maiores. Para as fundições, a tecnologia de SNPFM tornou-se uma ferramenta de avaliação do projeto e processo. As ferramentas de fundição consideram o comportamento do material, a composição química, a prática de fusão, a metalurgia, entre outros fatores [8].

Visando o desenvolvimento técnico, com foco em projetos de sistemas de enchimento por gravidade, este estudo propõe revisar conceitos, desenvolver uma metodologia de análise de reoxidação por simulação numérica, estudar novos *designs* de sistemas de enchimento em fundição por gravidade e correlacionar resultados da tecnologia de SNPFM com

a prática, bem como caracterizar os materiais investigados, visando entender características finais do componente obtido de acordo com o projeto de enchimento empregado.

Resultados de superfície de metal exposto ao ar [-], aprisionamento de ar [%], velocidade [m/s], inclusão por área [%] e inclusão por volume [%] utilizando a tecnologia de SNPFM foram avaliados. Ensaios foram realizados a fim de caracterizar o componente fundido de acordo o sistema de enchimento empregado e com os resultados obtidos por simulação numérica.

1.1 OBJETIVO

O principal objetivo deste estudo foi definir uma metodologia de análise de inclusões de reoxidação, em componentes fundidos por gravidade, reoxidações essas oriundas do projeto de sistemas de enchimento, por meio de *software* dedicado da tecnologia de SNPFM e validadas experimentalmente, que sirvam de referência para outras investigações e passível de aplicação em escala industrial, sendo os objetivos específicos:

- A. Análise SNPFM:
 - a. Parametrização e validação da metodologia de avaliação;
 - b. Dimensionamento do corpo de prova;
- B. Comparativos:
 - a. Análise superficial;
 - b. Propriedades mecânicas;
 - c. Caracterização das inclusões;

1.2 FLUXOGRAMA DA PESQUISA

O fluxograma com as ações da pesquisa foi demonstrado na Figura 1 para melhor compreender as etapas realizadas deste estudo, englobando desde a fundamentação teórica, planejamento das simulações numéricas, prática de fundição e finalmente a correlação de resultados por meio dos ensaios pré-determinados.

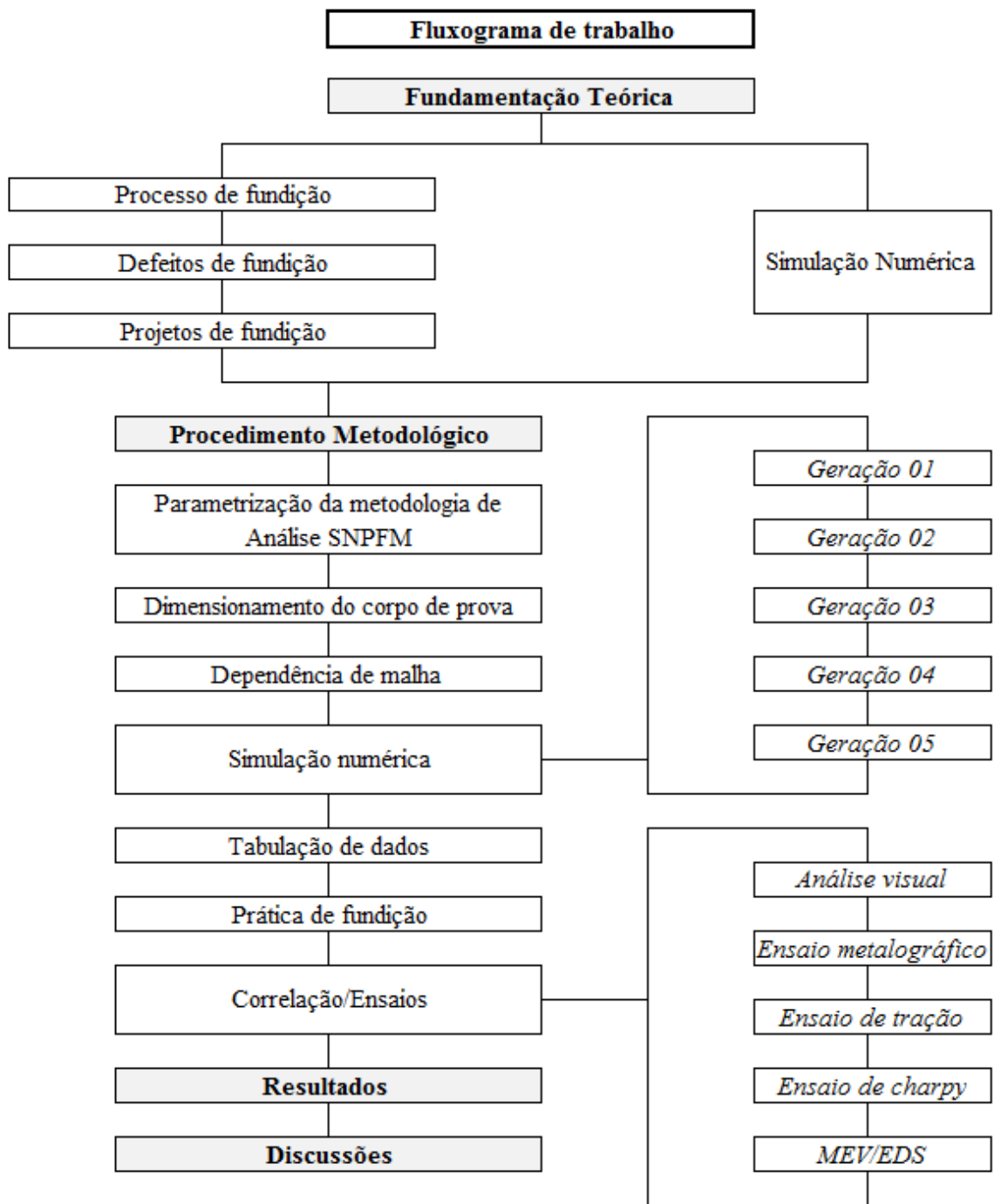


Figura 1 - Fluxograma de pesquisa e experimento dos estudos da Dissertação de Mestrado

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta a caracterização do processo de fundição estudado (fundição por gravidade), buscando vincular projeto e processo aos resultados finais do componente fundido, com foco em defeitos de reoxidação. Do mesmo modo, foram demonstrados os dados encontrados em literaturas, referentes a SNPFM, a fim de que tais conceitos sirvam de referência para o desenvolvimento do estudo.

2.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

A fundição é o processo de fabricação mais direto e versátil. A qualidade da fundição em areia depende de diferentes fatores, como a qualidade do metal líquido, a metodologia de introdução na cavidade do molde e sua subsequente solidificação [9].

2.1.1 Processo de fusão

Este estudo foi realizado com base em fornos de indução, que conforme Finardi [10] trabalham como equipamentos de fusão, exigindo seleção quanto à composição química do material introduzido, as principais etapas de processamento de um aço podem ser descritas como:

- A. Fusão;
- B. Ajuste da composição química;
- C. Ajuste da temperatura de vazamento;
- D. Desoxidação;

A desoxidação é geralmente feita pela adição de alumínio, devido a sua capacidade desoxidante (baixa energia livre para formação do óxido – alumina Al_2O_3). Entretanto, a utilização de alumínio como único elemento desoxidante apresenta como desvantagem a geração pequenas inclusões (inclusões de Al_2O_3) que reduzem a fluidez e usinabilidade do aço [11].

Assim, tradicionalmente a desoxidação de aços é feita em duas etapas, podendo também ser realizada na transferência do metal líquido do forno de indução para a panela de vazamento [12].

2.1.1.1 *Panela de válvula*

O processo de vazamento com panela de válvula foi demonstrada na Figura 2a, com a representação do enchimento de um molde com sistema de canais por gravidade, com ataque pelo fundo (conhecido dentro do processo de fundição como “ataque tipo cachimbo”) e o detalhamento do sistema de válvula é demonstrado na Figura 2b, com informações que devem ser consideradas.

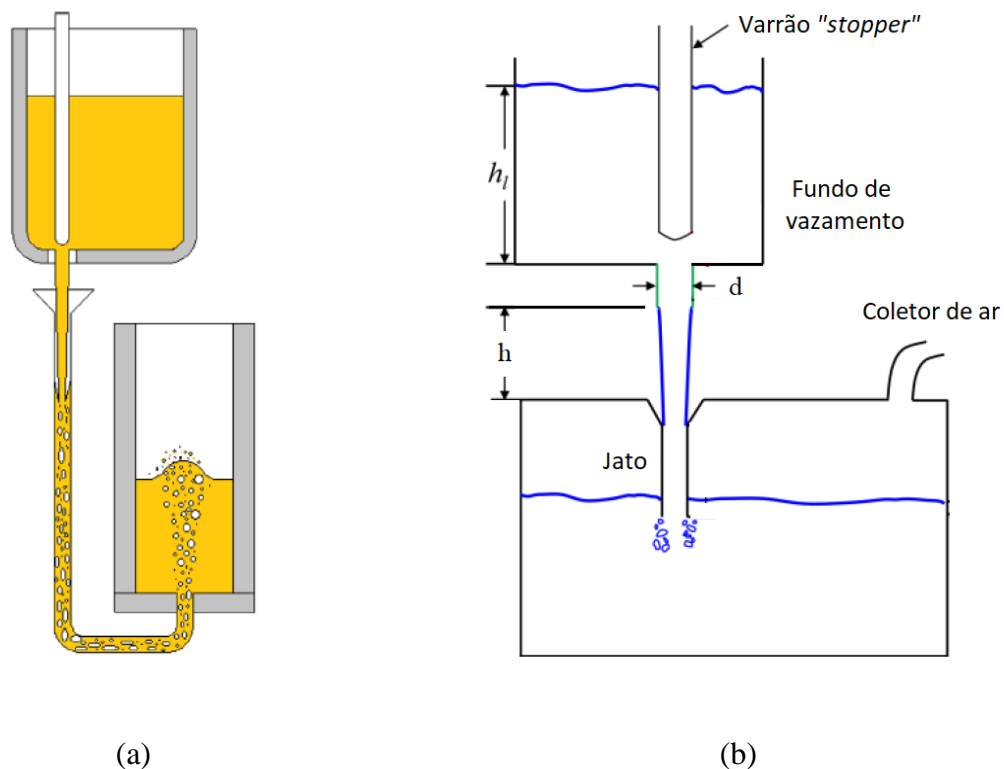


Figura 2 – Processo de fundição com panela tipo válvula (a) esquema típico [13] e (b) Configuração experimental [14]

Estudos laboratoriais demonstraram que o ar é arrastado quando o jato de água colide com a superfície em repouso, demonstrado na sequência de imagens da Figura 3. A água em repouso (Figura 3a) com o impacto do jato líquido (Figura 3b) causa o deslocamento de ar, mesmo posteriormente a estabilização de fluxo no decorrer do processo de enchimento é possível visualizar a criação de bolhas na periferia do jato (Figura 3c) [5].

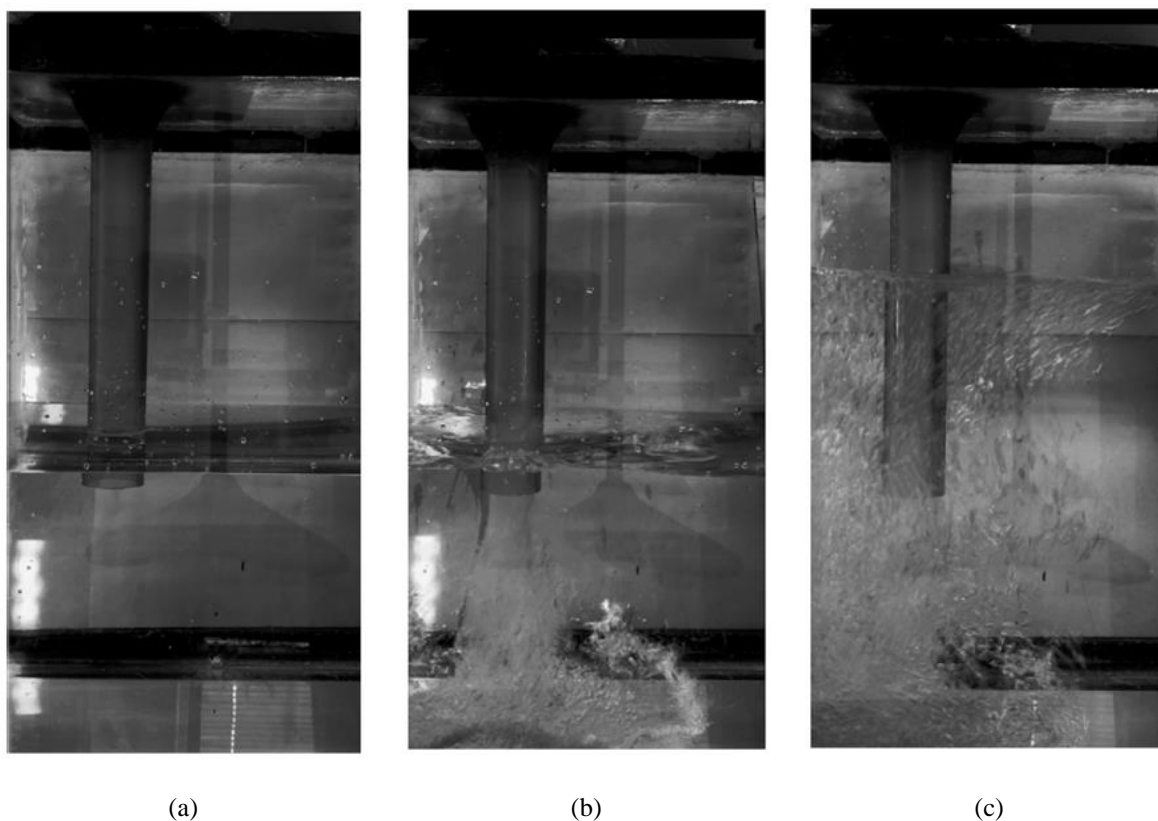


Figura 3 – Bolhas de ar arrastadas em tanque de água para única configuração em diferentes tempos (a) tempo de enchimento igual a 0 (zero) segundos, (b) tempo de enchimento igual a 0,5 segundos e (c) tempo de enchimento em 8,0 segundos [5]

Quando cheia a panela geralmente contém elevado volume e altura de metal líquido, isso significa que a velocidade de saída do bico inferior é acima de 4,5 m/s, esse jato é direcionado para o funil refratário. O sistema de canais atua como uma bomba de Venturi, bombeando ar para a corrente líquida, como consequência o metal líquido introduzido no sistema de enchimento consiste em aproximadamente 50% de metal líquido e 50% de ar [13].

O efeito da coluna de metal líquido (pressão hidrostática) sobre a variação da taxa relativa de entrada de ar foi demonstrada por Majidi e Beckermann [5] para a válvula totalmente aberta, sendo a Figura 4a com a capacidade total da panela preenchida com metal líquido, a Figura 4b com 50% do volume preenchido com metal líquido e a Figura 4c demonstrou o gráfico com a taxa de incorporação de ar relativa prevista dependendo do volume de metal líquido da panela.

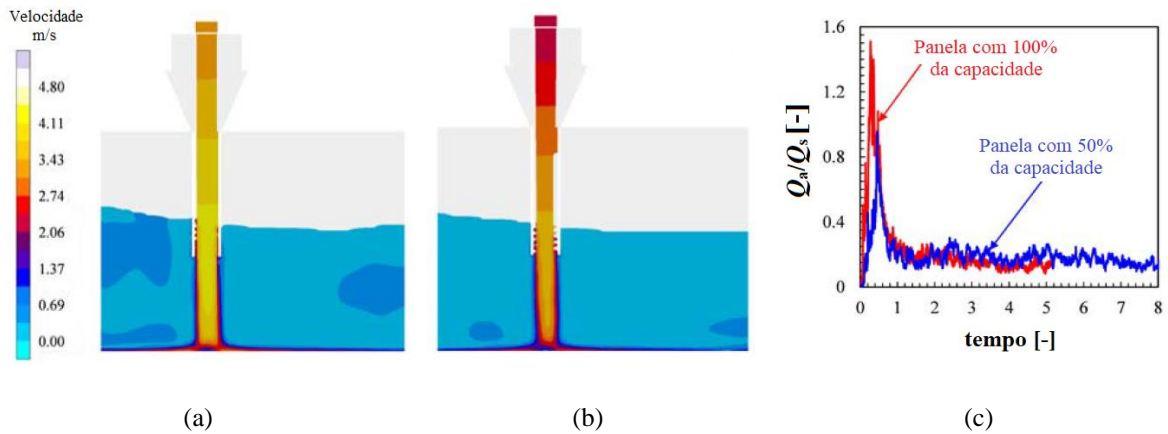


Figura 4 – Efeito pressão hidrostática sobre a variação da taxa relativa de entrada de ar pela quantidade de metal líquido para a válvula aberta (a) painel com 100% da capacidade (b) painel com 50% da capacidade (c) taxa relativa de arraste de ar (Q_a/Q_s) pelo tempo de enchimento.

Quanto maior coluna de metal líquido na panela maior a pressão hidrostática acima do bocal de vazamento, conseqüentemente elevando a velocidade do jato líquido e a taxa de arraste de ar. Após o pico inicial, a entrada de ar relativa diminui durante o preenchimento, a diminuição do arraste de ar é maior para a panela cheia, já que o recipiente é preenchido de forma mais rápida [5].

A Figura 5 comparou as previsões de arraste de ar para a válvula aberta e para válvula estrangulada (redução do coeficiente de descarga). A Figura 5a demonstra a válvula aberta no processo de enchimento da cavidade do molde, enquanto a Figura 5b demonstra o mesmo processo estrangulando a abertura da válvula.

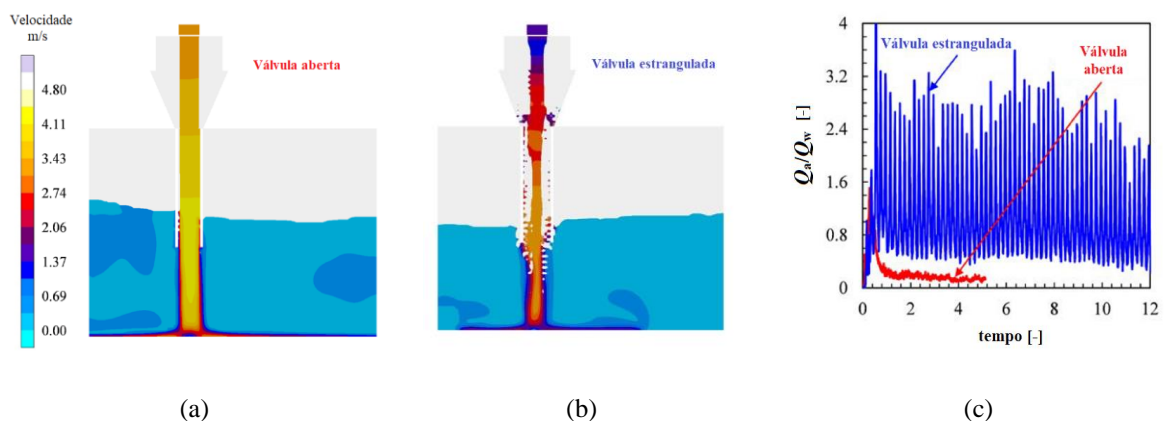


Figura 5 – Efeito da abertura do bocal na variação da taxa relativa de entrada de água (Q_w) [5]

O estrangulamento da válvula aumenta a intensidade da turbulência do jato líquido na saída, desta forma a taxa de arraste é significativamente maior para a válvula estrangulada do que para a configuração da mesma em aberto [5].

2.1.2 Fundição por gravidade

Durante o enchimento do molde, podem ocorrer diferentes tipos de fluxos de superfície livre que arrastam o ar, metal líquido mergulhando no sistema de canais, jatos emanando de canais de ataque, metal líquido caindo sobre bordas dentro da cavidade do molde e formação de ondas devido ao fluxo de material são alguns dos mais importantes exemplos. Portanto, a entrada de ar durante o vazamento depende do *design* do sistema canais [4].

O *design* inadequado do sistema de canais resulta na entrada de ar durante o enchimento da cavidade do molde. Arraste de ar e descontinuidades aumentam a exposição do metal líquido ao oxigênio. Uma vez em contato com o oxigênio o metal líquido reage para formar óxidos. Portanto a formação de inclusões de óxido (reoxidação) são regidos pelo conteúdo de oxigênio arrastado para o metal líquido [14].

Estudos de Campbell [15] demonstraram diferentes sistemas de fundição por gravidade, em que a base do canal se conecta com o canal de ataque (possíveis locais de filtro são indicados nas linhas tracejadas). Foi observado também que uma solução para o enchimento turbulento é a fundição contra gravidade, também conhecido como fundição por baixa pressão. As possibilidades são demonstradas na Figura 6.

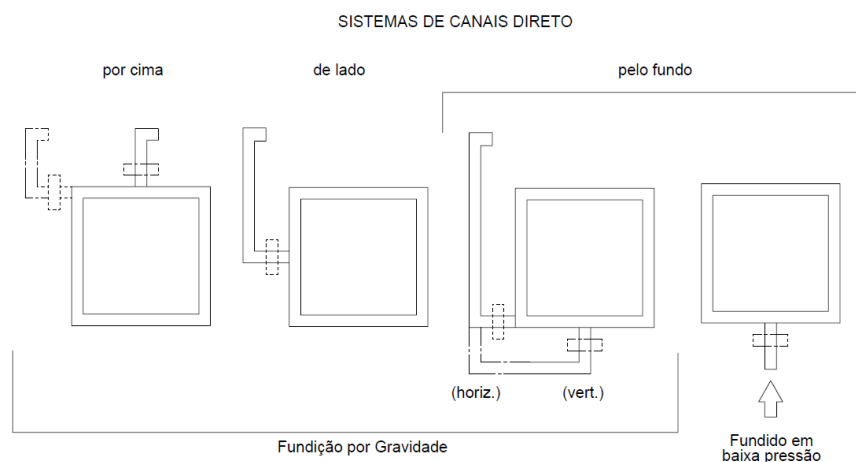


Figura 6 - Sistemas de canais por gravidade e contra gravidade (baixa pressão) [15]

Defeitos e/ou descontinuidades podem ser encontrados nas peças fundidas sem necessariamente serem o resultado de uma má prática de fundição. Tais defeitos e/ou descontinuidades podem ser controlados no processo de fabricação ou serem posteriormente removidos e substituídos por uma soldagem de recuperação. Mesmo com tais desvantagens o custo e liberdade geométrica fazem com que o processo seja amplamente utilizado a fim de alcançar o desempenho necessário nas aplicações [16].

2.2 DEFEITOS DE FUNDIÇÃO

O metal fundido tem uma ampla gama de aplicações, desde equipamentos pesados até indústrias automotivas e aeroespaciais. Defeitos de fundição nestes componentes afetam as propriedades mecânicas e podem causar a necessidade de reparos ou até mesmo levar a rejeição do material [14].

A definição de qualidade dos aços depende da aplicação final do produto. Inclusões se tornam importantes quando são responsáveis por produzir defeitos durante o processamento do aço ou na aplicação final. Quando quantidades significantes de grandes inclusões (por exemplo, 20 μm – 150 μm em diâmetro) são observadas defeitos tendem a ocorrer. Às vezes apenas uma única inclusão pode causar um defeito catastrófico [17].

Índices de refugo elevados e etapas adicionais de processamento/recuperação são um problema cada vez maior, visto a necessidade de aumento da produtividade e redução de custos [18]. Estima-se que 20% do custo de produção das fundições de aço é devido a remoção de inclusões de reoxidação e reparo destas áreas pelo processo de soldagem [19].

A aglomeração de inclusões em seções críticas geralmente significa tempos de limpeza excessivos e podem levar a uma redução inaceitável das propriedades mecânicas. Peças fundidas são frequentemente sucateadas devido a defeitos superficiais relacionados a inclusão, muitos destes descobertos durante o processo de usinagem. A maioria das inclusões em peças fundidas de aço é causada pela reoxidação do metal através do contato com o ar durante o processo de enchimento do molde [20].

Segundo Iqbal, Sheik, Al-Yousef e Younas [21] dados de defeitos correlacionados a sistemas de enchimento são um grande desafio para fundição. Alguns dos fatores mais significativos que contribuem para defeitos correlacionados a sistemas de enchimento são temperatura, tempo e padrão de enchimento.

O projeto do sistema de enchimento possui papel fundamental na qualidade final do produto fundido, podendo o mesmo definir a viabilidade ou não da aplicação final do componente [22].

2.2.1 Inclusões

As formações de inclusões não metálicas durante a solidificação podem influenciar as propriedades mecânicas dos aços. A simulação computacional oferece uma maneira eficaz e valiosa para estudar o processo devido à dificuldade de investigação [23].

Em peças fundidas de aço baixa liga, a reação entre o aço desoxidado e o oxigênio é responsável pela formação de inclusões de reoxidação circulares (Figura 7) [14].

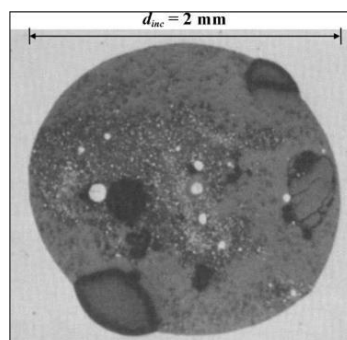


Figura 7 - Inclusão de óxidos em peças fundidas em aço contendo 34% de Al_2O_3 , 46% de SiO_2 e 20% MnO [24]

2.2.2 Oxidação

Como a oxidação é um fenômeno de superfície, a formação do primeiro filme de óxido inibe o contato entre o metal e o ar, tendendo a diminuir ou mesmo impedir a continuidade da reação. No metal líquido, a turbulência decorrente das transferências entre panelas durante o vazamento contribui para quebrar esse filme, expondo novas superfícies metálicas para a oxidação [25].

2.2.3 Reoxidação

O processo de oxidação durante o vazamento do metal líquido do forno para a panela de vazamento e da panela para a o molde é conhecido como reoxidação, na qual resíduos dos desoxidantes adicionados são consumidos pelo contato com o ar. Tal fenômeno pode ser minimizado/evitado projetando adequadamente sistemas de enchimento [13].

Inclusões de reoxidação estão entre os defeitos mais comuns relatados em fundição de aço. Essas inclusões afetam a resistência à fadiga, a tenacidade à fratura e a usinabilidade de uma peça fundida, podendo causar sua rejeição. [5].

O arraste de ar é a principal fonte de formação de inclusão de reoxidação durante o vazamento de peças de aço. Nos fluxos de superfície livre, o ar é arrastado quando o líquido sofre turbulência. Tais descontinuidades superficiais são criadas, por exemplo, por um salto hidráulico (Figura 8), que ocorre quando um líquido em movimento rápido é descarregado em uma atmosfera de baixa velocidade ou por um jato líquido mergulhando em um recipiente inicialmente em repouso (Figura 9) [5].

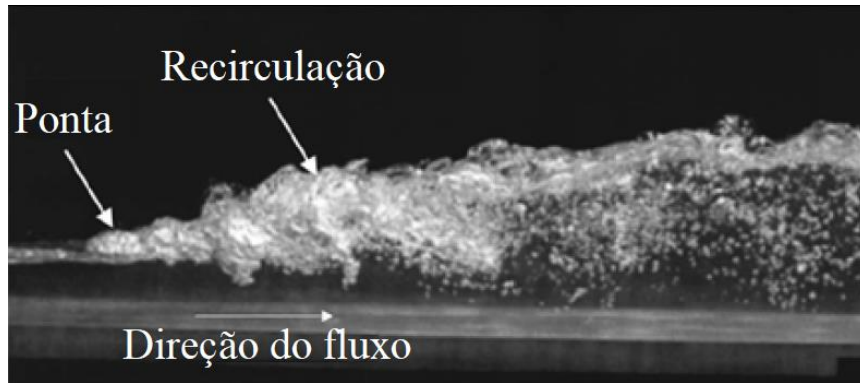


Figura 8 – Estimativa de escala de comprimento de superfície livre em salto, adaptado de [26].

A viscosidade do aço carbono baixa liga é quase idêntica a viscosidade da água a temperatura ambiente. Devido a essa semelhança, a modelagem em água é utilizada para simular o comportamento do fluxo de metal líquido. O princípio de entrada de ar é afetado pela tensão superficial e velocidade da superfície do metal fundido. A superfície do metal fundido é coberta por uma película de óxido incluindo o funil de vazamento. O ar é arrastado para o metal e bi-filmes se formam conforme demonstrado nas Figura 8 e Figura 9 [27].

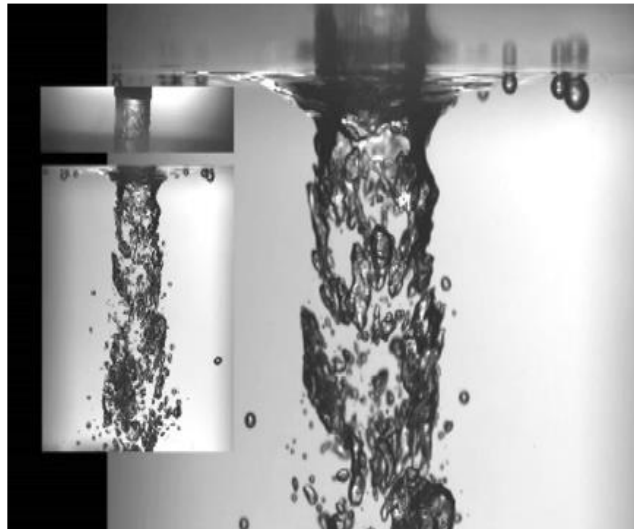


Figura 9 - Bolhas de ar perto de um mergulho de um jato de água líquido, reproduzido a partir de "Mecanismos de atrito do ar em jatos – (*Breaking Waves*)" [28]

Resultados de estudos experimentais demonstraram que, para um mergulho de jato líquido, a incorporação de ar não ocorre abaixo de uma determinada velocidade. Uma vez que a força inercial do jato líquido imposto supera as forças restritivas, ou seja, a tensão superficial e forças de flutuação, o ar é arrastado no perímetro de intersecção do jato líquido e do banho exposto [14].

Segundo Fuoco R. [18] inclusões de reoxidação o contato do metal líquido com o ar produz reações do oxigênio com os elementos desoxidantes dissolvidos no aço, produzindo

óxidos complexos, contendo CaO , Al_2O_3 , SiO_2 , MnO e Cr_2O_3 , estes óxidos formam partículas finas que se aglomeram e tendem a se concentrar na superfície superior das peças fundidas, conforme demonstrado na Figura 10.



Figura 10 – Exemplos de inclusões de reoxidação na superfície de peças fundidas em aço (a) superfície com defeito (b) detalhe da inclusão (aproximado) [18]

A análise MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) de inclusões similares as apresentadas na Figura 10 foram demonstrada na Figura 11, em estudo de Fuoco R. [29], demonstrando inclusões de SiO_2 e Al_2O_3 .

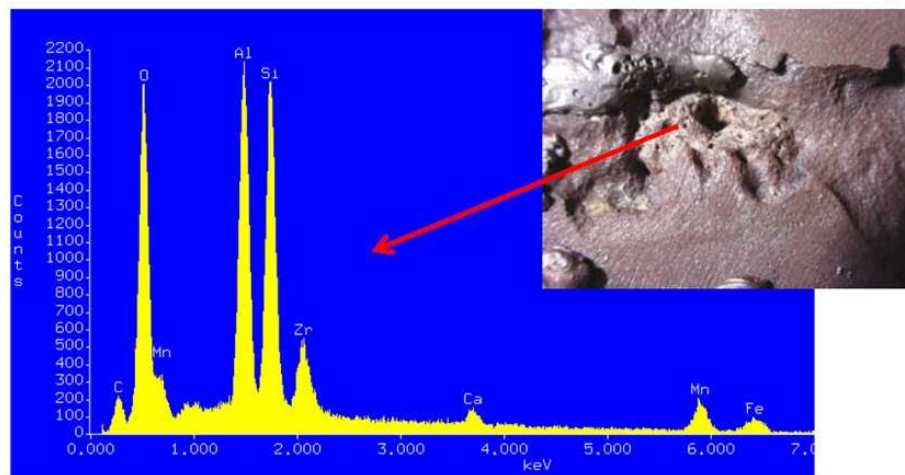


Figura 11 - Inclusões de óxidos em peças de aço fundido, contendo SiO_2 e Al_2O_3 - [30]

Em estudos de Marquardt [2] amostras de peças em aço que apresentavam inclusões superficiais repetitivamente no produto final (Figura 12) foram analisadas a fim de avaliar sua origem. Na Figura 12a uma foto do produto fundido é demonstrada com inclusões superficiais e na Figura 12b um detalhe aproximado da mesma.

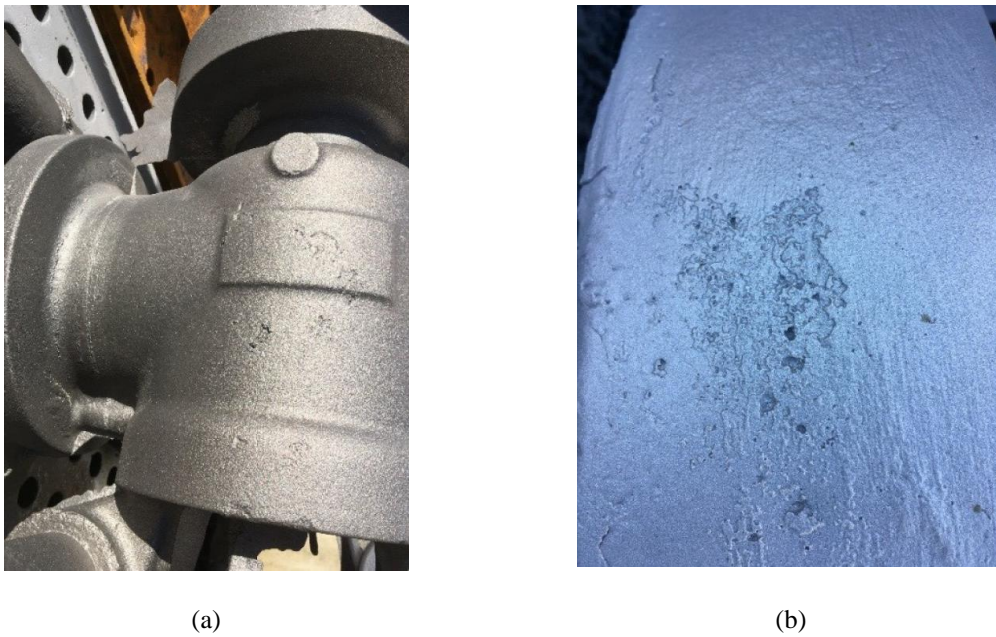


Figura 12 – Inclusões superficiais em peças de aço (a) produto final com inclusões superficiais e (b) detalhe característico das inclusões [2]

Amostras referentes a Figura 12 foram preparadas e uma análise MEV foi realizada e demonstrada na Figura 13, a fim de verificar a composição dos elementos na região das inclusões. Na Figura 13a foi indicado os três pontos analisados, a Figura 13b demonstra o resultado para o ponto 1 (um),, no estudo de Marquardt [2] quatro elementos se repetem em grande concentração Si (silício), Al (alumínio), O (oxigênio) e Zr (zircônio).

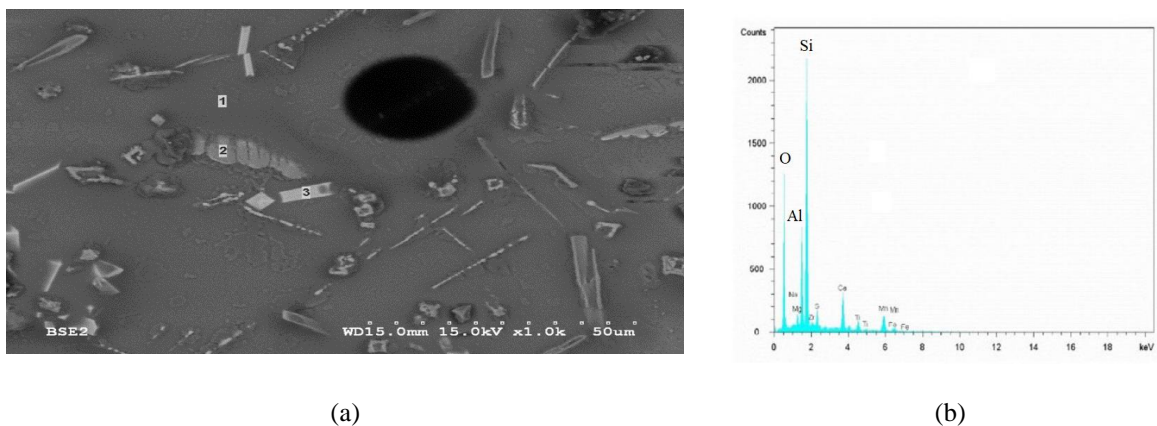


Figura 13 – Análise MEV (a) indicação dos pontos analisados e (b) resultado do ponto 1 (um) [2]

Segundo Marquardt [2], como foram utilizados sílica e zircônio para moldagem e revestimento de moldes utilizando alumina e zircônio, é esperado a presença dos mesmos na análise realizada, no entanto, o elemento que não deveria constar seria o oxigênio, formando assim óxidos complexos conforme descritos por Fuoco R. [18].

2.2.4 Bi-filmes

O arraste de ar na superfície livre leva a criação de bi-filmes, em turbulências severas, bolhas de ar podem ser formadas, a diferença entre bi-filmes e bolhas é a quantidade de ar que cada um destes contém. Além disso, pequenas bolhas são frequentemente observadas nos centros dos bi-filmes [13].

A maior diferença entre bolhas e bi-filmes está em sua flutuação, os bi-filmes permanecem em suspensão como resultado de sua baixa flutuabilidade e alto arraste, as bolhas possuem maior flutuabilidade e tendem a gerar maiores problemas [13].

Os bi-filmes de óxido gerados no processo convencional possuem a tendência de crescer em aglomerações não metálicas maiores à medida que a solidificação avança. A Figura 14 demonstra defeitos correlacionados a bi-filmes oriundos do processo de vazamento do metal líquido [27].

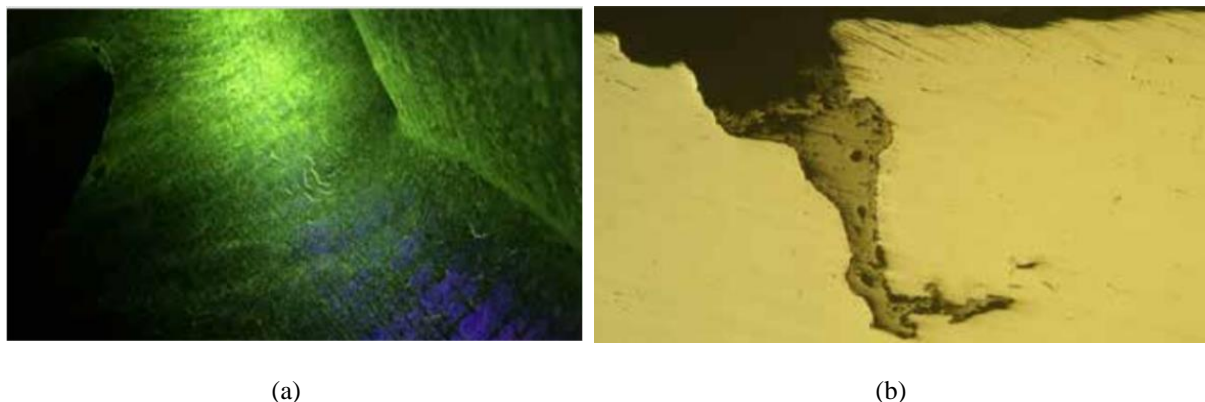


Figura 14 – Defeito correlacionado a bi-filmes (a) fissuras em linha na superfície da peça fundida, revelado por líquido penetrante fluorescente e (b) seção vertical da fissura superficial (aumento 100x) [27]

Durante a turbulência no vazamento do metal, colisões entre gotículas e ondas causam a superfície do metal líquido filmes de óxido. Uma ação análoga ocorre durante o dobramento da superfície do metal líquido, duas superfícies se juntam (óxido seco com óxido seco) formando uma interface entre dois filmes estáveis de óxido, mas sem ligação. O Filme duplo, conhecido como bi-filme, é submerso. Durante um enchimento turbulento, o metal líquido é preenchido com essas fissuras (Figura 15). Este arraste do filme de óxido é o mecanismo pelo qual ocorre a reoxidação do aço [13].

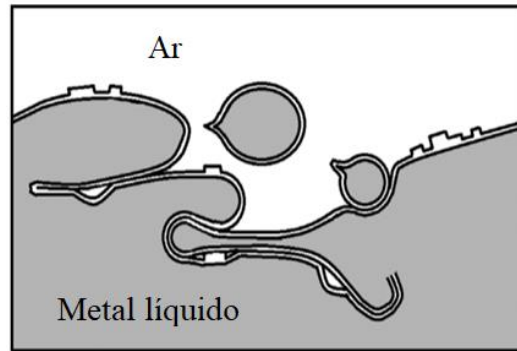


Figura 15 – Formação de bi-filme durante a turbulência superficial do aço líquido [13]

Os filmes de óxido formados nestes eventos transitórios da turbulência têm pouco tempo para crescer para mais que alguns nanômetros de espessura. Muitas vezes essas aglomerações se concentram nos contornos de grão, formando uma intransponível divisão entre os mesmos. A tensão de tração tende a abrir os bi-filmes, dando a impressão de “contorno de grão fraco” quando submetidos a esforços [13].

Outro aspecto que reflete a influência do filme de óxido à subida irregular do nível do líquido dentro do molde (Figura 16). À medida que o nível de metal sobe no molde, o filme superficial vai sendo repetidamente quebrado e levado para os lados sendo incorporado pela parede superficial da peça [31].

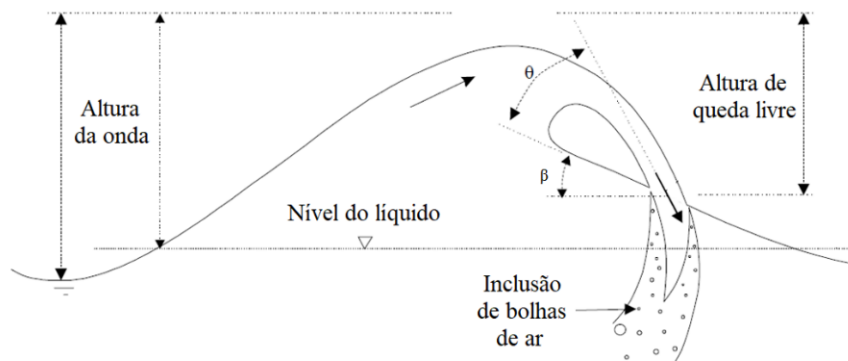


Figura 16 - Esboço de uma onda quebrando [32]

Estudos de Derakhti e Kirby [33] demonstram a agitação superficial do líquido. Essa agitação superficial pode levar a reoxidação do metal e a inclusões de bi-filmes e bolhas na peça durante o enchimento da cavidade do molde. Quanto maior a turbulência gerada na superfície do enchimento, maiores serão as inclusões geradas no processo de enchimento.

Portanto, se não forem tomados os devidos cuidados pode ocorrer à agitação superficial com projeção de líquido durante o enchimento de peças e, conseqüentemente, a formação e incorporação de filme de óxidos durante a fundição de peças de ligas metálicas [25].

2.2.5 Bolhas de ar

À medida que as bolhas sobem para flotar, seus filmes de óxido se partem na parte superior, o óxido desliza efetivamente ao redor da bolha, e finalmente, se unem sobre a bolha, óxido seco com óxido seco, ficando em forma de um tubo colapsado. As trilhas de bolhas podem formar as fissuras no metal fundido, mas em condições turbulentas frequentemente se misturam em uma massa emaranhada, formando aglomerações [13].

As bolhas de ar formadas devido à turbulência no sistema de canais tendem a flotar, deixando atrás de si um tubo de óxido (Figura 17). Por outro lado, se isso não ocorrer, sua incorporação à peça fundida acentuará os efeitos nocivos em relação as propriedades mecânicas [13].



Figura 17 - Uma bolha, soltando sua pele de óxido como uma trilha [3]

As trilhas de bolha são tubos de óxido colapsados contendo ar ou argônio residual, estes geralmente possuem grande comprimento e seus emaranhados tornam-se grandes áreas de porosidade aparentes nas radiografias e seções metalúrgicas [3].

2.2.6 Fragilização das propriedades mecânicas por reoxidação

Se um óxido de superfície for deixado intacto e não romper, o mesmo não tem o potencial de degradar as propriedades mecânicas produto fundido, no entanto, se por turbulência as duas superfícies secas entrarem em contato, não haverá adesão. Efetivamente os óxidos se tornam microporosidades que podem servir como ponto de iniciação/propagação de fissuras. Se estes são gerados em concentrações suficientemente altas, possuem a capacidade de se aglomerar, formando macro inclusões [2].

Estudos de Love, Pettit e Messenger [34] demonstram a aglomeração de diferentes materiais conforme demonstrado na Figura 18, não observando forte dependência da

composição dos mesmos. A Figura 18a demonstra o material recentemente agitado e alguns segundos após na Figura 18b com aglomeração das partículas.

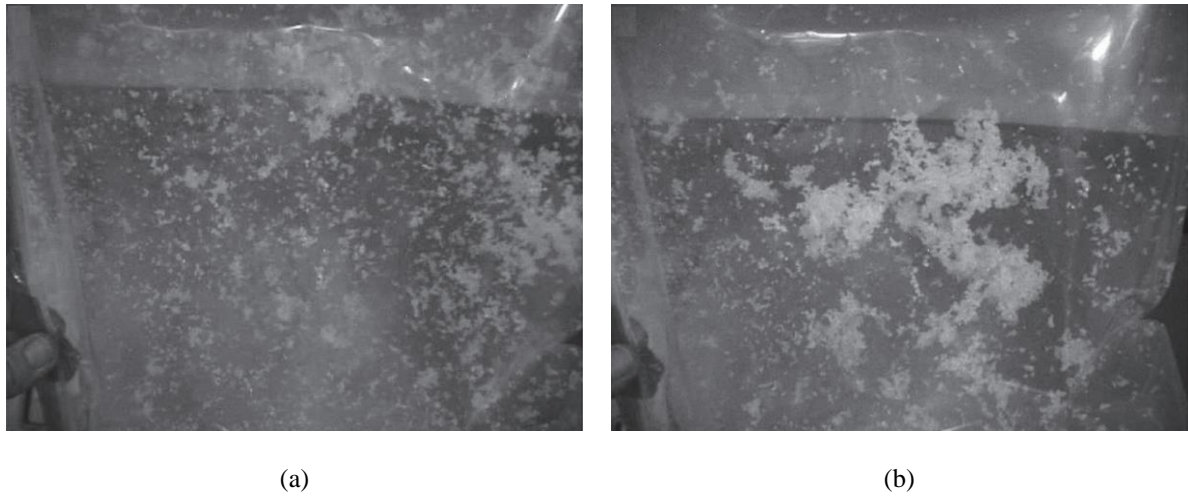


Figura 18 – Cristais de sal (NaCl) com tamanho de 0,5 – 1,0 mm, suspenso no ar com densidade numérica de aproximadamente 10cm^{-3} . a) imediatamente após agitação e b) mesmo experimentos alguns segundos após a agitação [34]

Autores como Campbell [13] e Marquardt [2] citaram este tipo de aglomeração em inclusões de reoxidação em ligas metálicas. Podendo essas partículas serem comparadas com bolhas e bi-filmes no processo de fundição e aglomeração das mesmas em pontos específicos do produto final fundido. Estudos de Zhang, et al. [35] demonstram que regiões com concentrações de inclusões podem ser o local de iniciação de trincas por fadiga (Figura 19).

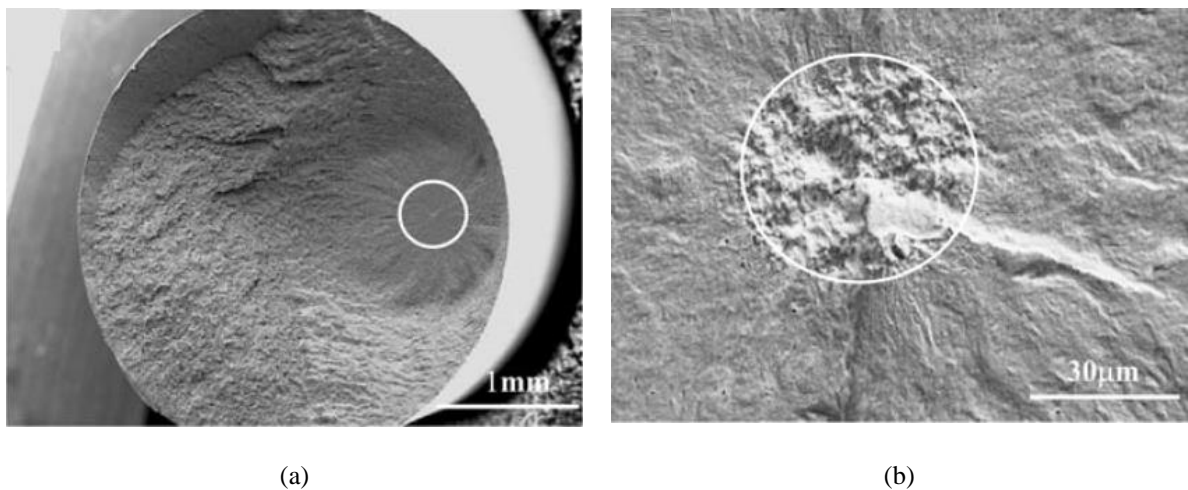


Figura 19 – Local de iniciação de trinca pela aglomeração de inclusões em ensaio de fadiga (a) ampliação baixa e (b) ampliação alta [35]

Como descrito por Campbell [3] e visualizado na Figura 20, bi-filmes de óxido são encontrados entre as dendritas, esses filmes entre grãos metálicos limitam as propriedades

mecânicas significativamente. Os bi-filmes podem iniciar trincas durante a solidificação e atuam como nucleação para inclusões não metálicas e formação de segregação de elementos no contorno de grão como o enxofre, carbono entre outros. Descontinuidades na matriz metálica permitem trincas e fissuras durante o tratamento térmico.

A Figura 20a mostra dendritas na superfície de fratura de um molde em liga de Ni CY40, a fratura iniciada em um bi-filme de óxido (praticamente invisível) cobre a superfície das dendritas. Alguns detritos de óxidos podem ser visualizados na superfície do bi-filme [3].

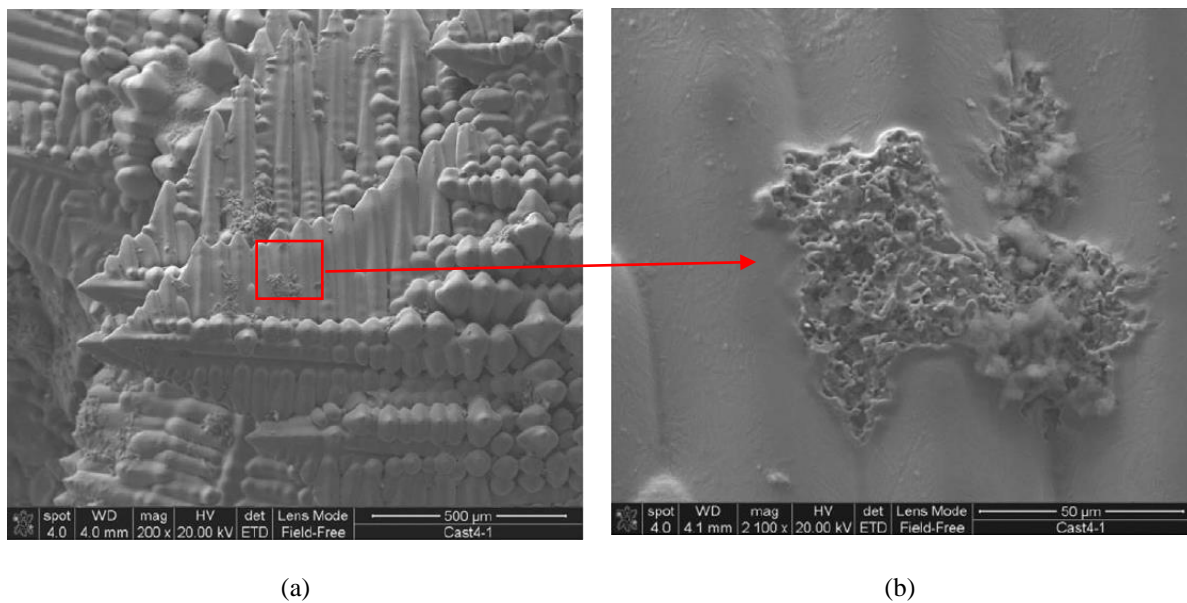


Figura 20 – Fratura da liga à base de Ni CY40 (a) dendritas revestidas por bi-filmes na superfície fraturada e (b) detalhe dos detritos de óxido na superfície do bi-filme [13].

Na Figura 20 as dendritas não estavam deformadas, indicando que a localização da fratura ocorreu na superfície das mesmas, sem esforço, como resultado da presença de um bi-filme que se estende sobre a superfície da fratura [13].

De modo geral, para aços de alta resistência, inclusões competem com a matriz como iniciadores da trinca por fadiga, conseqüentemente, quanto menor o tamanho da inclusão, menor a probabilidade para que a fratura se inicie da mesma [35].

Conforme Sigl, Hardin, Stephens e Beckermann [36] toda porosidade é prejudicial a resistência a fadiga dos componentes fundidos, os poros agem como concentradores de tensão nucleando trincas a partir dos mesmos.

2.3 PROJETOS DE FUNDIÇÃO – SISTEMAS DE ENCHIMENTO

O objetivo de um sistema de enchimento é atingir a vazão desejada em locais específicos da cavidade do molde, de maneira eficiente, é essencial que o metal líquido flua através dos canais sem desenvolver filmes de óxido prejudiciais ou aprisionar bolhas de ar no metal líquido. O desempenho depende de um projeto de canais preciso, que possa direcionar o fluxo de metal líquido sem deixar espaços vazios ou lacunas dentro da geometria do canal durante o processo de enchimento [37].

Com base em estudos estabelecidos em fundição, três condições de *designs* proeminentes devem ser satisfeitas em um sistema de enchimento ideal a fim de reduzir o arraste de ar [38]:

- A. A velocidade no mergulho deve ser menor ou igual à velocidade crítica (0,5 m/s) na parte inferior do canal. [3];
- B. Atenuar o comprimento total do canal para minimizar a perda térmica [39] e fornecer tempo suficiente para as bolhas de gás “escaparem” no molde [40];
- C. Evitar mudanças bruscas no perfil do canal ou na interseção [3];

Evitar a turbulência do líquido que entra na cavidade do molde é provavelmente a regra mais complexa de se cumprir quando se trata de sistema de enchimento por gravidade [15].

2.3.1 Velocidade crítica

A turbulência no processo de fundição é diretamente associada a velocidade do metal líquido e ao formato do sistema de enchimento. Uma maior turbulência tende a gerar um maior número de inclusões por reoxidação, conseqüentemente o material possuirá uma menor qualidade [41].

Se a velocidade aumentar além da tensão natural da superfície de uma determinada liga, a mesma se romperá expondo uma quantidade exponencial de nova superfície a atmosfera (oxigênio) e por sua vez, formando cada vez mais óxido [2].

O conceito de velocidade crítica de Campbell [15] foi representado na Figura 21, nela pode-se observar que na condição da Figura 21a que a velocidade é igual a zero, porém essa não atende o processo de fundição de metais já que não ocorre o preenchimento da

cavidade do molde, na condição da Figura 21b a velocidade é crítica (0,5 m/s), acima dela ocorre o fenômeno da situação representada na Figura 21c, situação na qual existe o “efeito chafariz”, gerando instabilidade superficial do líquido e conseqüentemente quebra e mistura do filme de óxido.

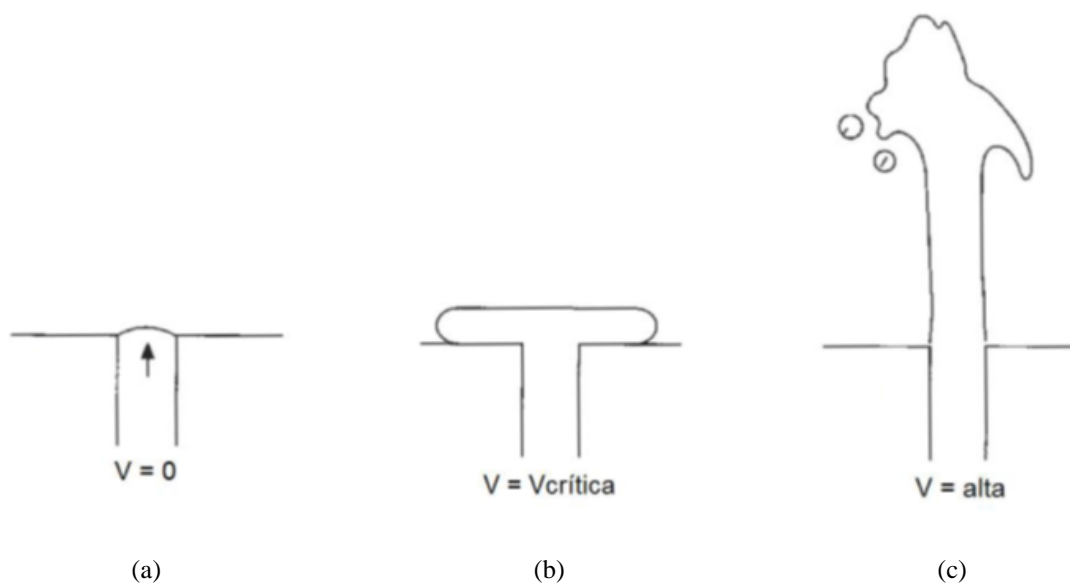


Figura 21 - Velocidades de enchimento (a) velocidade igual a zero (b) velocidade crítica (0,5 m/s) (c) velocidade alta, acima da velocidade crítica [15]

Desta forma, a condição demonstrada na Figura 21b se torna a ideal para o processo de fundição [41].

2.3.2 Tempo de enchimento

Considerando que não ultrapassar a velocidade crítica é essencial para a qualidade do material, o tempo de enchimento precisa ser bem estudado, com um elevado tempo de enchimento o material pode solidificar antes de preencher toda a cavidade do molde, já para um baixo tempo de enchimento a tendência de ultrapassar consideravelmente a velocidade crítica é maior [41].

Estudos de Majidi e Beckermann [42] demonstraram que a redução do tempo de enchimento ($t_{enchimento}$) pela elevação da vazão (Q_s) reduz a admissão de ar durante o processo de enchimento da cavidade do molde. A Figura 22 demonstrou a variação do tempo de enchimento de acordo com a elevação da taxa de vazamento, a Figura 22a para 50,8 segundos, a Figura 22b para 25,4 segundos, a Figura 22c para 16,9 segundos e Figura 22d para 12,7 segundos.

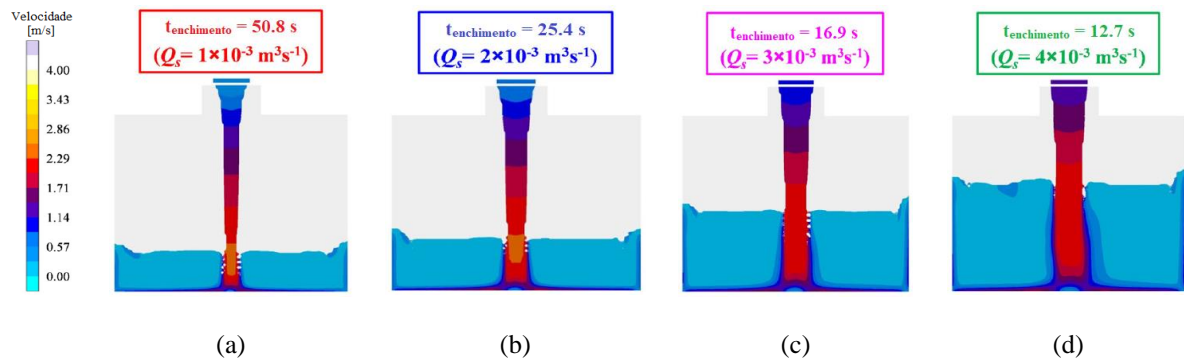


Figura 22 – Variação do tempo de enchimento no preenchimento da cavidade do molde (a) tempo de enchimento 50,8 segundos e $Q_s = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, (b) tempo de enchimento 25,4 segundos e $Q_s = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, (c) tempo de enchimento 16,9 segundos e $Q_s = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e (d) tempo de enchimento 12,7 segundos e $Q_s = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ [42]

A Figura 23 demonstrou o resultado de admissão de ar (Q_a) pela a vazão de metal líquido (Q_s) no eixo vertical em função do tempo em segundos no eixo horizontal, a Figura 23b demonstrou o resultado de volume final de ar (V_a) sobre o volume de metal (V_s), o volume de metal é igual para as 4 (quatro) configurações no eixo vertical referentes a Figura 22.

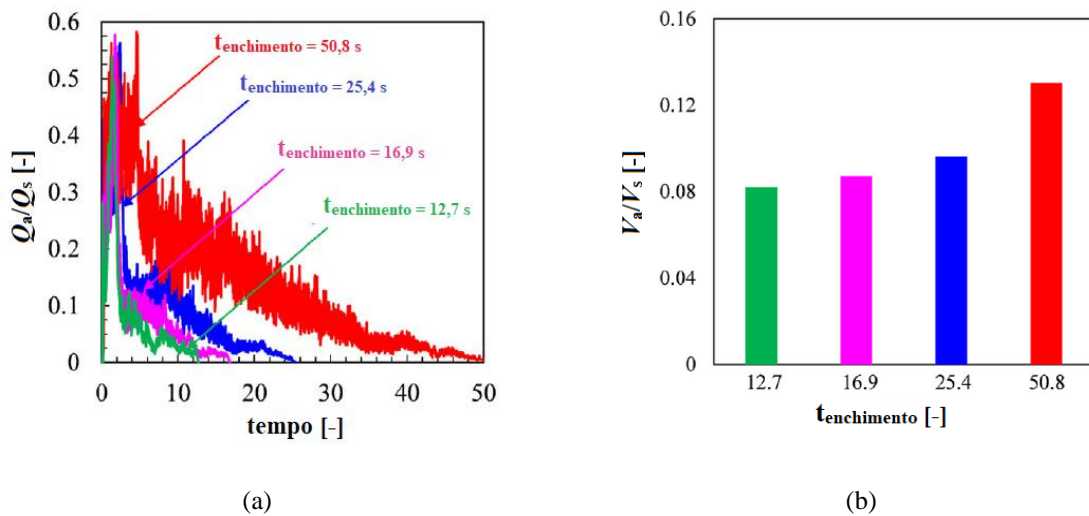


Figura 23 – Gráficos demonstrando o efeito do tempo de enchimento em (a) Q_a/Q_s em função do tempo e (b) V_a/V_s para os tempos de enchimento [42]

Observa-se que para menores tempos de enchimento, para uma mesma quantidade de metal líquido a admissão de ar (Q_a) e o volume final de ar (V_a) são significativamente menores [42].

2.3.3 Taxas de vazão

Ainda em estudos de Majidi e Beckermann [42] foi demonstrado que a taxa de admissão de ar durante o preenchimento do molde depende da velocidade e diâmetro do jato líquido aplicado no processo de fundição. A Figura 24a demonstra o vazamento realizado com diâmetro do jato líquido em 25,4 milímetros, a Figura 24b com diâmetro 31,75 milímetros, a Figura 24c com diâmetro 63,5 milímetros e a Figura 24d com diâmetro 76,2 milímetros, o vazamento foi mantido constante até 25 segundos para comparação entre resultados.

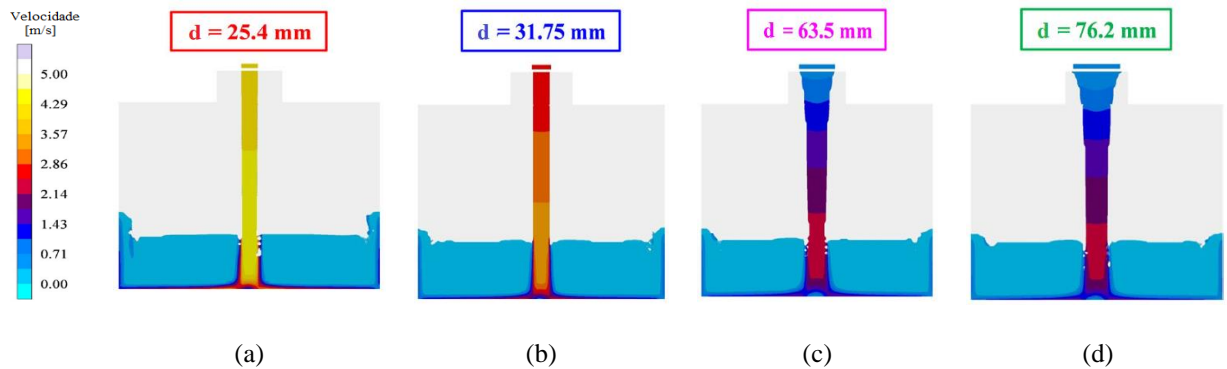


Figura 24 – Alteração do diâmetro da válvula de vazamento (a) diâmetro do bico 25,4 mm, (b) 31,75 mm, (c) 63,5 mm e (d) 76,2 mm [42]

A Figura 25a demonstrou o resultado de admissão de ar (Q_a) sobre a quantidade de metal líquido (Q_s) no eixo vertical e função do tempo (25 segundos) no eixo horizontal, a Figura 25b demonstra o resultado de volume final de ar (V_a) sobre o volume de metal (V_s) no eixo vertical para 6 (seis) diferentes diâmetros (d) de jato líquido [42].

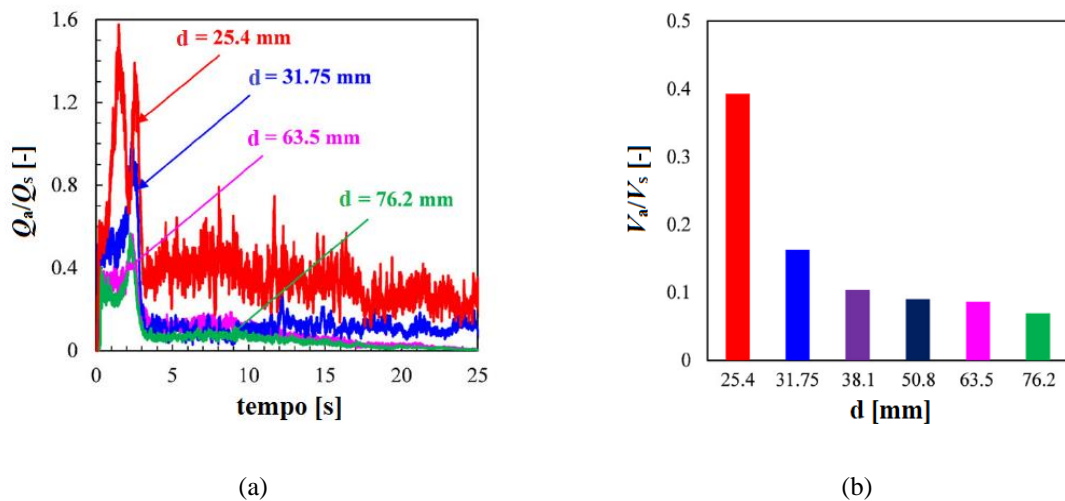


Figura 25 - Gráficos demonstrando o efeito do diâmetro do fluxo de vazamento (a) Q_a/Q_s em função do tempo e (b) V_a/V_s para os diâmetros de 25,4 mm à 76,2 mm [42]

Maiores diâmetros de jatos líquidos no processo de fundição estão associados a maiores taxas de vazão, que por consequência reduzem o tempo de enchimento da cavidade do molde. É possível observar resultados decrescentes tanto para Q_a/Q_s , como também para V_a/V_s para o aumento do diâmetro do jato líquido no vazamento [42].

2.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DE METAIS

Conforme Oliveira e Galhardi [8] os melhores projetos de componentes e processos de fundição são obtidos com interações entre engenheiros de fundição, projetistas e o uso de ferramentas de engenharia, como CAD (*Computer Aided Design*) e CAE (*Computer Aided Engineering*), ao invés da metodologia de tentativa e erro as empresas podem utilizar ferramentas computacionais para o aperfeiçoamento dos projetos e processos.

No processo de fundição de metais, tudo acontece ao mesmo tempo e está intimamente ligado. Embora isso possa ser visto como uma vantagem competitiva se comparada com demais processos de fabricação, torna decisões sobre o *layout* de fundição complexas [20].

Ferramentas de simulação do processo de fundição têm sido utilizadas por engenheiros para confirmar conjuntos de parâmetros de processo selecionados e avaliar um determinado *layout* de fundição, são realizadas alterações dos parâmetros de projeto e processo, como sistemas de canais e geometria dos ferramentais, para se aproximar ao máximo dos objetivos pré-estabelecidos [20].

Projetistas utilizam *softwares* de SNPFM para analisar e otimizar o *design* de fundição. Com o objetivo principal em aumentar a resistência em zonas críticas, atingindo o máximo desempenho no vazamento do metal líquido. A demanda por alta qualidade forçou o desenvolvimento tecnológico na produção de peças fundidas em diversos setores da indústria [27].

O *software* MAGMASOFT® permite a variação de diferentes sistemas de enchimentos conforme demonstrado na Figura 26 a fim de avaliar o resultado final de inclusões de reoxidação na superfície da peça fundida em aço (inclusão por área) [20].

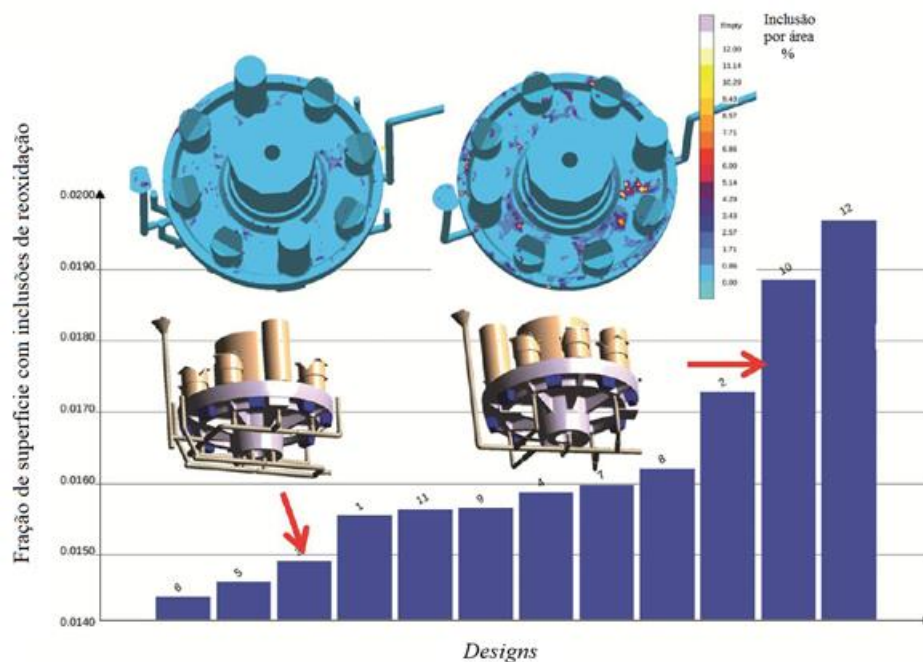


Figura 26 – Avaliação automática e quantitativa de diferentes projetos de sistema de enchimento relacionados a qualidade da superfície [20]

Diferentes *designs* foram mostrados no gráfico de barras e ordenados de acordo com a qualidade da superfície, permitindo uma seleção rápida entre bons e ruins *designs*. Um bom resultado foi demonstrado no *design* 3 e um ruim no *design* 10 [20].

Estudos de Povlak e Sturm [43] demonstraram inclusões de óxido criadas durante o processo de vazamento das ligas de alumínio. Qualquer processo de vazamento que gere turbulência superficial promove a ruptura dos filmes de óxido, que então são arrastados para o metal líquido, as peles de óxido levam a uma separação do material dentro da microestrutura, que, dependendo do seu tamanho, podem causar uma redução das propriedades mecânicas locais.

Ainda em estudos de Povlak e Sturm [43] foi demonstrado na Figura 27 o desenvolvimento da superfície livre durante o processo de enchimento, e a otimização deste parâmetro para redução de inclusões de reoxidação.

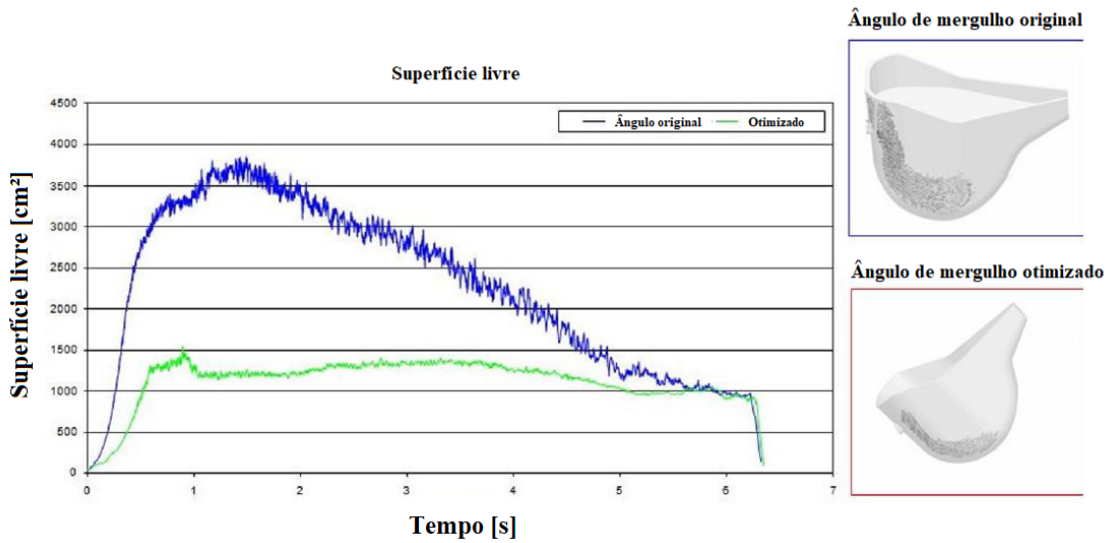


Figura 27 – Análise da superfície livre durante o processo de enchimento [43]

Aplicando a metodologia junto a demais resultados avaliados neste estudo foi possível obter a redução de inclusões de reoxidação se comparadas ao projeto original para fundição de blocos de motor, reduzindo o número de vazamentos em testes práticos [43].

2.4.1 Dependência de malha

Uma malha consiste em cubos de um determinado comprimento lateral. A Figura 28 demonstrou uma variação do dimensionamento da malha de 1.6 a 3.6 milímetros, para análise de um determinado jato, os valores calculados possuem uma ligeira diminuição à medida que a malha é refinada. Essa dependência de resultados é considerada aceitável. Pelo menos quatro pontos de avaliação são necessários para resolver numericamente um jato líquido [44].

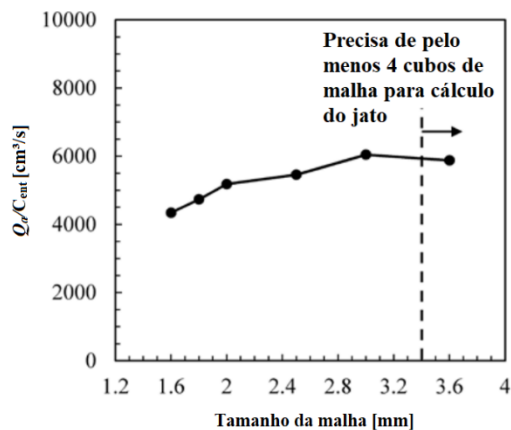


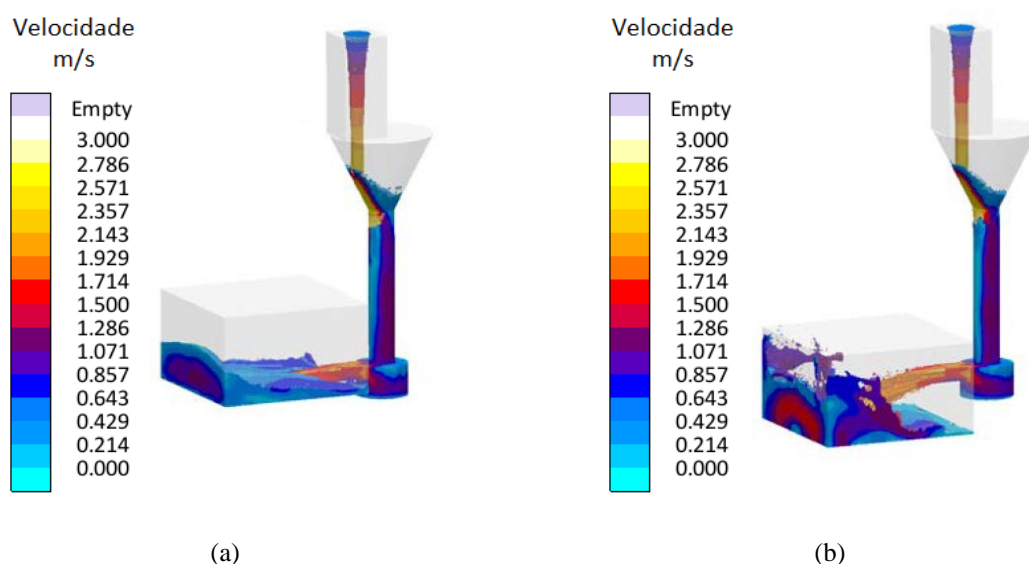
Figura 28 - Taxa de arraste de ar calculada em função do espaçamento da rede para um jato de água em mergulho [44]

Softwares de SNPFM são utilizados rotineiramente na indústria de fundição para modelar não somente a solidificação, mas também o preenchimento do molde com o metal líquido. Tais enchimentos são geralmente unilaterais, o que significa que eles apenas calculam o fluxo do metal, mas não o de ar e o movimento de bolhas de ar, que seriam difíceis de simular diretamente já que esses fenômenos ocorrem em uma escala tão pequena que eles não podem ser resolvidos por uma malha computacional típica utilizada no processo de SNPFM (da ordem de milímetros) [14].

Para evitar tempo computacional excessivo, modelos aproximados ou sub gráficos foram desenvolvidos, que buscaram calcular a entrada de ar como parte de um sistema de simulação de dinâmica de fluidos computacional em malha relativamente grosseira, ou seja, não resolve diretamente os redemoinhos turbulentos e as bolhas de ar [14].

2.4.2 Análise do ponto de ataque

Majidi e Beckerman [14] compararam três diferentes pontos de ataque em um molde denominado como corpo de prova, com ataque lateral inferior (Figura 29a), ataque lateral intermediário (Figura 29b) e ataque lateral superior (Figura 29c), a fim de avaliar a incorporação de ar dependente do ponto de ataque utilizado, o gráfico da Figura 29d demonstrou a admissão de ar (Q_a) referente a vazão volumétrica do metal líquido (Q_s).



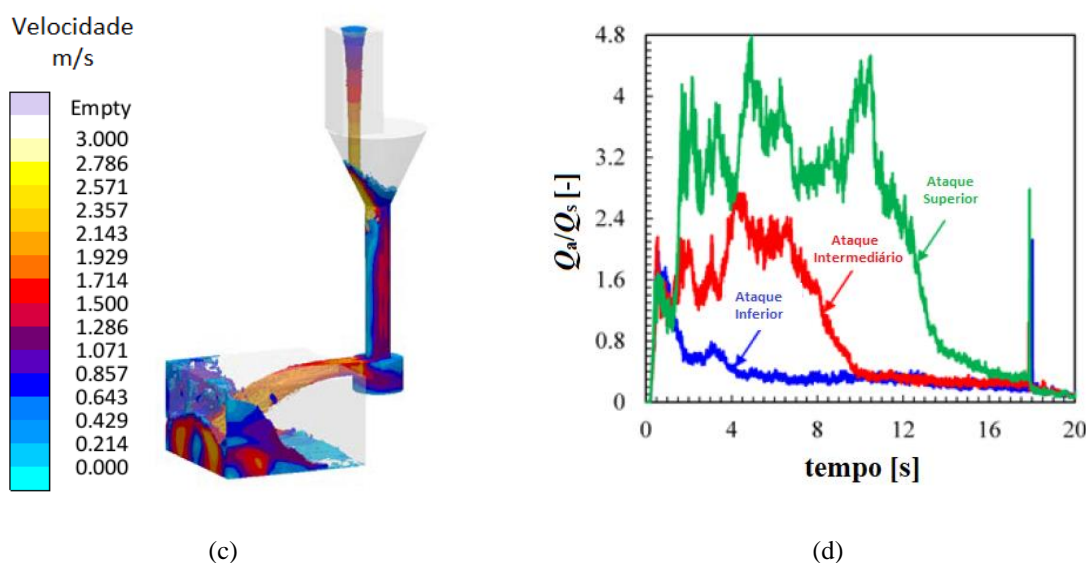


Figura 29 - Resultado de velocidade do MAGMASOFT® em corpos de prova com diferentes pontos de ataque (a) ataque lateral inferior, (b) ataque lateral intermediário, (c) ataque lateral superior e (d) gráfico comparativo da taxa de arraste volumétrico de ar no aço (Q_a/Q_s) em função do tempo [14]

Para a Figura 29a com ataque lateral inferior, foi observado que este tipo de ataque proporcionou um enchimento com baixa turbulência, causando uma restrição do fluxo de entrada já no início do processo de enchimento da peça, diferente do que ocorre na Figura 29b com ataque lateral intermediário e agravado na Figura 29c com ataque lateral superior [14].

Analisando o gráfico da Figura 29d foi possível observar que a segunda queda do metal líquido dentro da cavidade do molde faz com que não ocorra a pressurização do sistema ou a estabilização do fluxo de metal líquido elevando a taxa de arraste volumétrico de ar no aço [14].

A Figura 30a demonstrou o “efeito cachoeira” em um sistema de enchimento projetado com partição vertical em tubos de ferro fundido nodular, a Figura 30b demonstrou o resultado obtido em prática de fundição dependente do projeto utilizado [18].

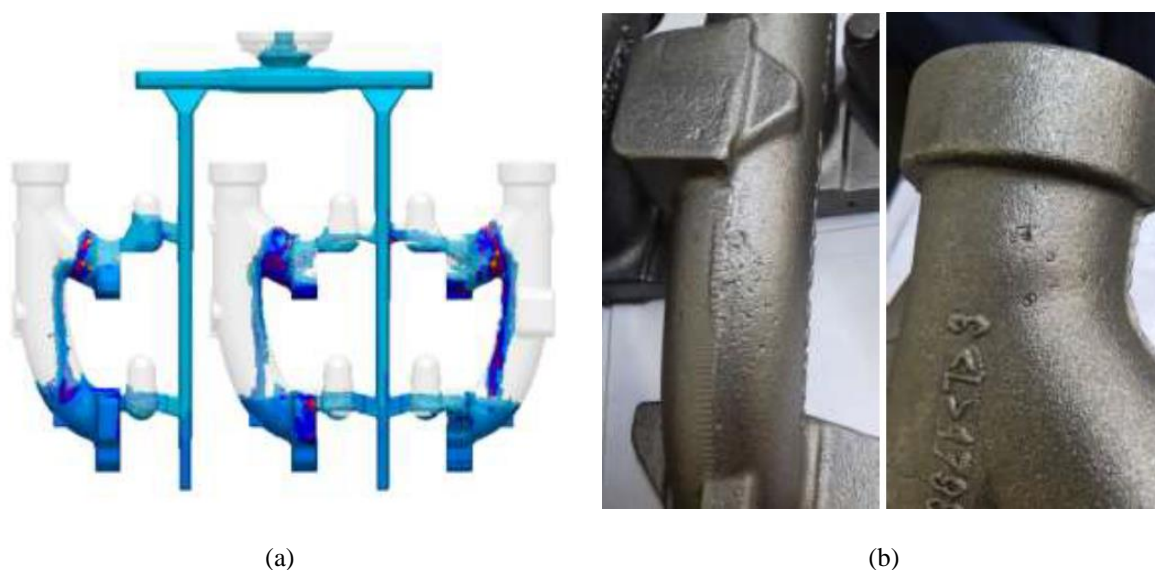


Figura 30 – Fundição de tubos em ferro fundido nodular com partição vertical (a) simulação numérica e (b) acabamento superficial resultante em prática de fundição [18]

O efeito cachoeira promoveu o preenchimento turbulento da cavidade do molde, e como consequência o aparecimento de defeitos superficiais, como bolhas de ar e inclusões de reoxidação na superfície da peça demonstrada na Figura 30b [18].

2.4.3 Bacia de vazamento

Segundo Campbell [15] o funil cônico é o mais utilizado nas fundições devido sua facilidade de moldagem, porém pode apresentar alguns problemas em relação a velocidade de enchimento, inclusão de escoria e pressurização do sistema dependente do operador da panela.

Campbell [45] sugeriu o uso de uma bacia de vazamento em fundição por gravidade para reduzir a entrada de ar. A Figura 31 demonstra um projeto para uma bacia de vazamento que foi dimensionada para os estudos de Majidi e Beckermann [44].

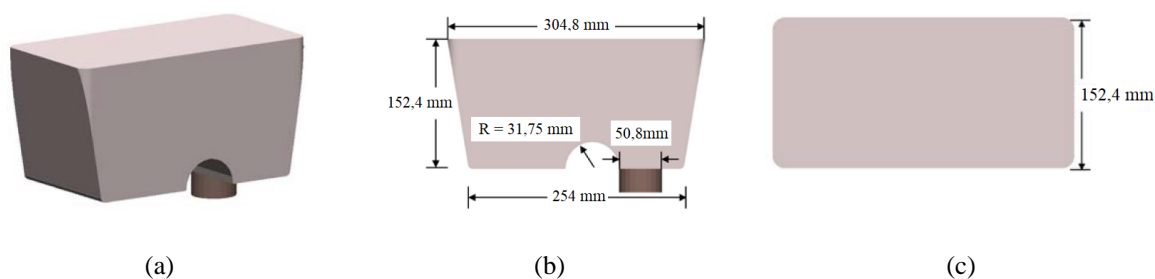


Figura 31 - Geometria da bacia de despejo: (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista superior [44]

A Figura 32 comparou as previsões de arraste de ar para o funil de vazamento com impacto lateral (Figura 32a), funil de vazamento com impacto de fundo (Figura 32b) e bacia de vazamento (Figura 32c), os resultados são demonstrados para o sistema pressurizado (Figura 32d) e não pressurizado (Figura 32e). A Figura 32f compara os resultados para o volume de ar sobre o volume de aço (V_a/V_s) para as 6 (seis) possibilidades estudadas na Figura 32 [44].

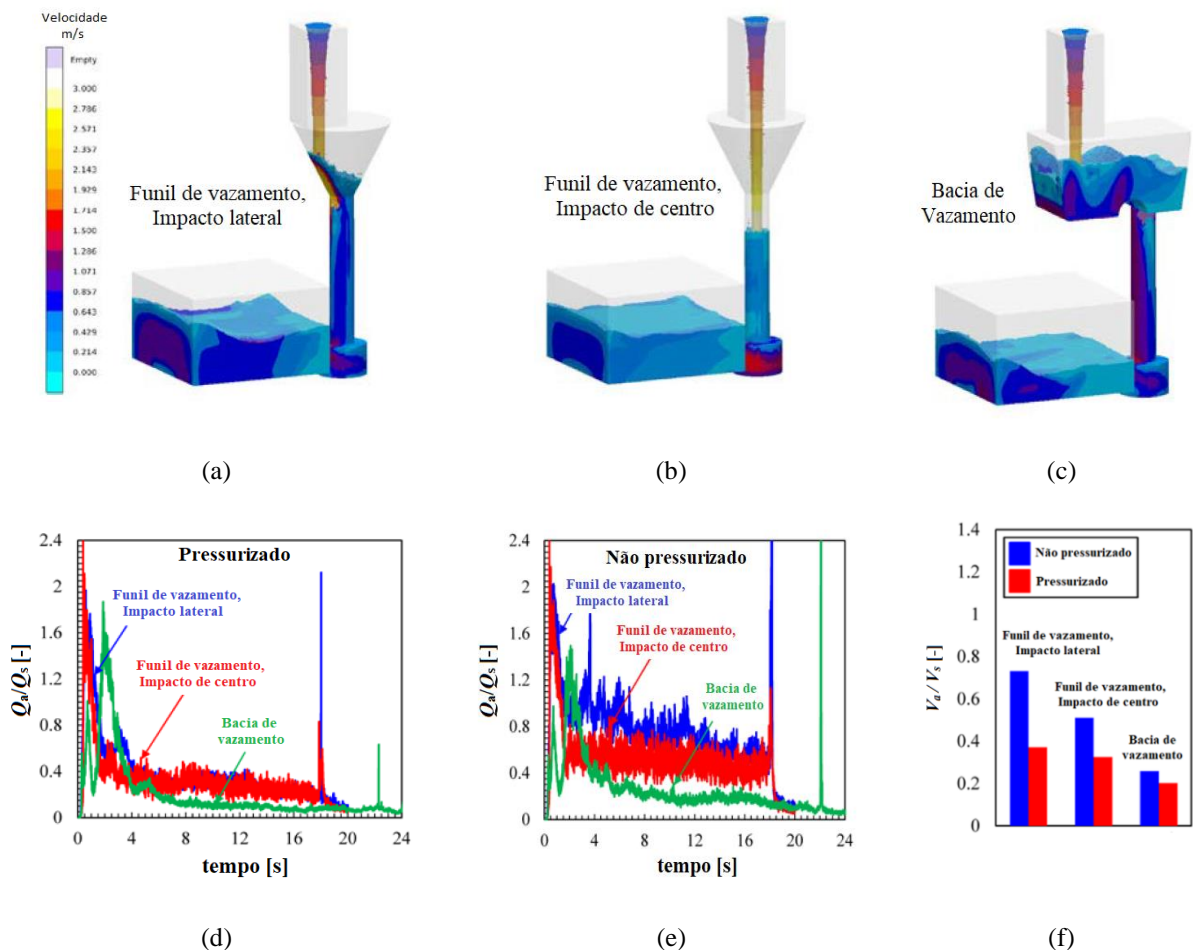


Figura 32 – Comparativo entre funil de vazamento tipo cone e bacia de vazamento (a) funil de vazamento com impacto lateral, (b) funil de vazamento com impacto de fundo, (c) bacia de vazamento, (d) taxa de arraste volumétrico de ar no aço para o sistema pressurizado (e) taxa de arraste volumétrico de ar no aço para o sistema não pressurizado e (f) volumes totais previstos de arraste de ar para as configurações estudadas [44]

Em ambos os casos, a taxa de arraste de ar para a bacia de vazamento (*offset pouring basin*) foi significativamente menor do que para o funil de vazamento tipo cone (*cone cup*). Durante os primeiros quatro segundos de enchimento, a taxa de entrada de ar para a bacia projetada mostrou dois picos. O primeiro pico é devido ao impacto de metal quando colidiu com a parte deslocada da bacia, enquanto o segundo pico é devido ao metal líquido da bacia mergulhando no canal vazio [44].

As flutuações na taxa de arraste de ar para a bacia de vazamento foram menores do que para o funil de vazamento tipo cone, indicando que uma bacia ajuda a tornar o fluxo de enchimento mais estável. Foi possível observar que o processo de enchimento leva cerca de quatro segundos a mais para a bacia de vazamento, já que a quantidade de metal líquido é maior do que para o funil tipo cone [44].

Segundo Marquardt [2] a altura da bacia também possui influência fundamental já que a mesma deve permitir que o óxido flutue antes de ser sugado pelo canal. A Figura 33 demonstrou inclusões encontradas em uma bacia de vazamento corretamente dimensionada.

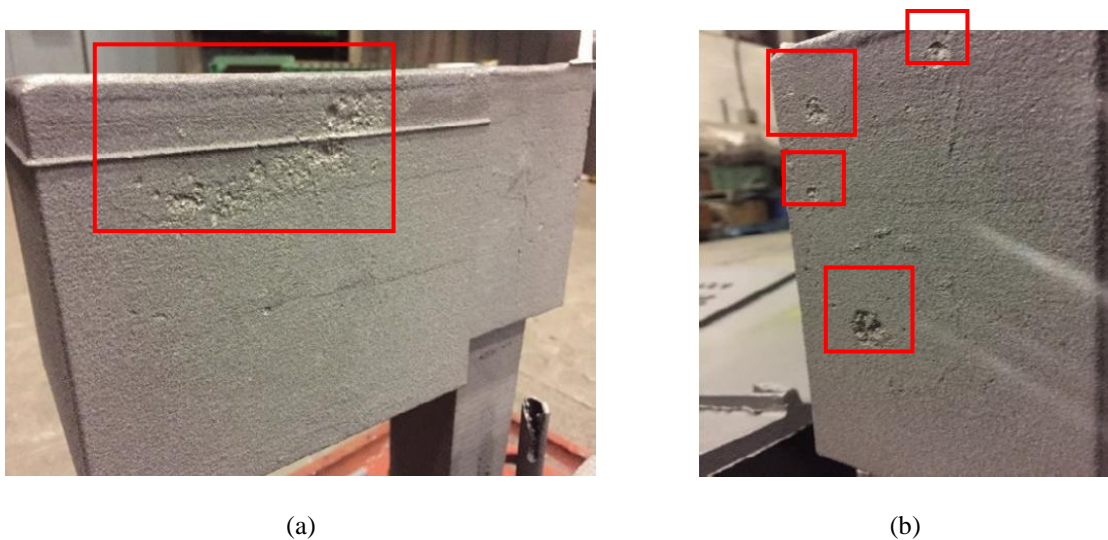


Figura 33 – Inclusões de reoxidação encontradas em uma bacia de vazamento (a) vista lateral e (b) vista frontal [2]

A analogia utilizada para esse fenômeno é que dependendo da altura de absorção do metal líquido na bacia faz com que óxidos sejam, ou não, sugados para o canal de descida vertical [2].

2.4.4 Canais de descida

O perfil do canal não deve violar a condição de altura crítica de queda nem sofrer mudanças abruptas na direção do fluxo. Teoricamente, um sistema inclinado simples, conforme demonstrado na Figura 34a, eliminaria alguns desses desafios. A fim de demonstrar a total liberdade de projeto do 3DSP (*3D sand printing*), Sama, Badamo, Lynch e Manogharan [38] estudaram perfis matemáticos que atendessem condições ideais de um projeto de fundição e descobriram que os perfis parabólico (Figura 34b), hiperbólico (Figura 34c) e cônico helicoidal (Figura 34d) mostram resultados promissores.

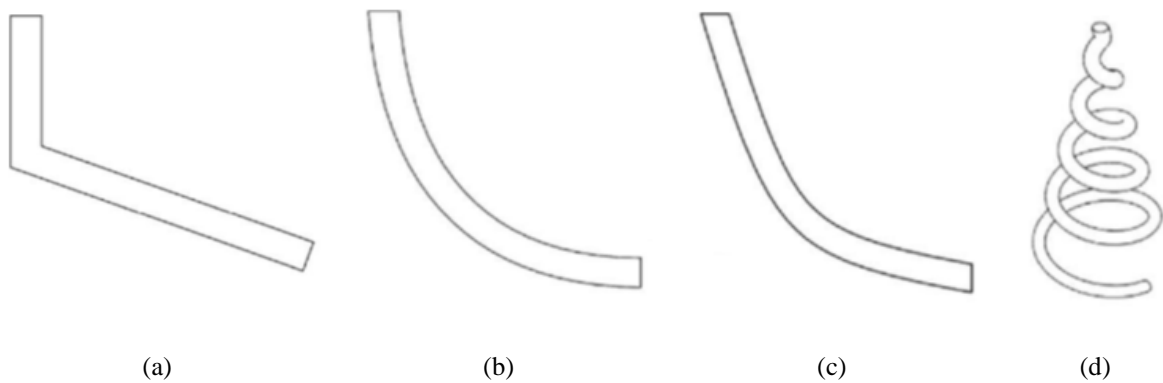


Figura 34 - Diferentes tipos de sistemas de vazamento (a) inclinado, (b) parabólico, (c) hiperbólico e (d) cônico helicoidal [38]

Segundo Sama [1] as vantagens dos sistemas cônicos helicoidais propostos são:

- A. Se cuidadosamente projetados, o metal do canal deve estar completamente de acordo com a condição de altura de queda para o sistema e liga,
- B. O problema de zonas de baixa pressão na junção dos canais são devidos a transformação abrupta da energia cinética vertical para cinética horizontal. Em contraste, a curvatura inerente do perfil da hélice cônica transpõe a direção da energia cinética perpendicularmente (isto é, da vertical para horizontal).
- C. O comprimento total da curva do perfil cônico helicoidal é muito maior que o perfil reto, aumentando assim a interação de atrito das paredes do canal de entrada com o metal para diminuir a velocidade de fluxo de fusão.

2.4.5 Sistemas tubulares

Estudos de Djoka, Jezierski e Campbell [46], utilizando um molde de teste de acordo com o padrão Polonês PN-H-04309: 1976, avaliaram a utilização de sistemas tubulares para fundição por gravidade, utilizados nas indústrias de fundição devido à simplicidade de execução utilizando manilhas refratárias.

A Figura 35 do estudos de Djoka, Jezierski e Campbell [46] demonstrou a tecnologia inicial utilizada, sendo a Figura 35a no início do processo de enchimento 1 (um) segundo, a Figura 35b com 2 (dois) segundos de enchimento e a Figura 35c já para a parte final do processo com 4 (quatro) segundos, bastante similar ao praticado em diversas fundições para

peças de peso relativamente grande (funil de vazamento tipo cone, canal de descida com manilha refratária e ataque pelo fundo “tipo cachimbo”).

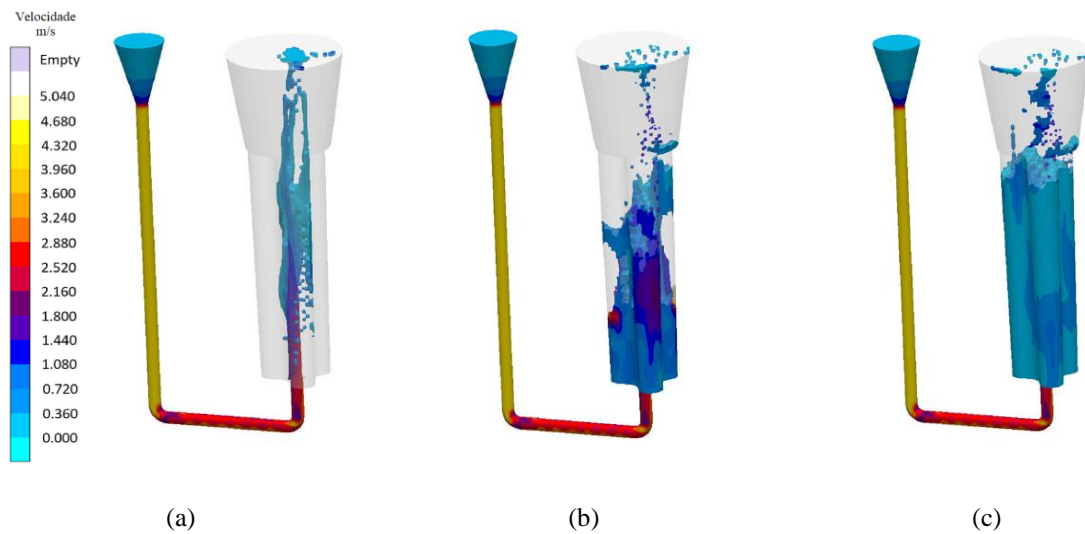


Figura 35 – Sistema de enchimento tubular com ataque pelo fundo com acompanhamento do tempo de enchimento após (a) 1 (um) segundo, (b) 2 (dois) segundos e (c) 4 (quatro) segundos [46]

Foi observado velocidades do metal líquido em torno 5m/s no canal de descida e entrada na cavidade do molde por volta de 3m/s, muito acima dos 0,5m/s descritos como velocidade crítica, como resultado foi observado turbulência ao longo de todo o processo de enchimento [46].

2.4.6 Sistemas helicoidais

Estudos de Sama, Badamo, Lynch e Manogharam [38] demonstraram matematicamente o cálculo para um sistema de cônico helicoidal utilizado em fundição por gravidade e a utilização da impressão 3D em areia (3DSP), o design do sistema de enchimento de canais oferece uma grande oportunidade para explorar a liberdade geométrica ilimitada a fim de satisfazer a condição de velocidade crítica de 0,5 m/s.

O processo 3DSP possui potencial de melhorar significativamente o desempenho mecânico e metalúrgico de peças fundidas em areia. O perfil calculado é demonstrado na Figura 36c e aplicado na fundição de um corpo de prova, comparado com dois sistemas tipicamente utilizados em projetos de fundição conforme Figura 36a (canal direto) e Figura 36b (canal parabólico) [38].

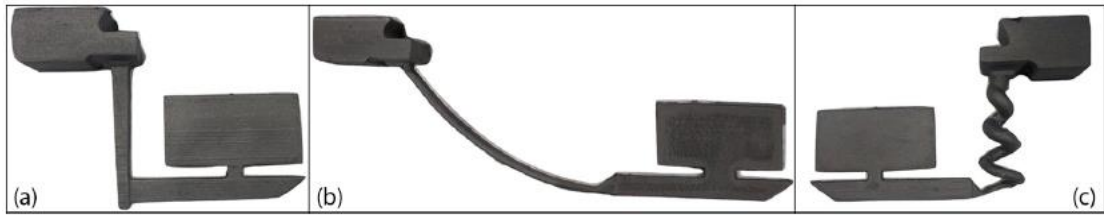


Figura 36 - Corpos de prova (a) canal direto; (b) canal parabólico; (c) canal cônico helicoidal

Um ponto de controle na simulação numérica (Figura 37a) foi adicionado para comparação entre a fração volumétrica de arraste de ar (Figura 37b), nele é observado o arraste de ar na peça em função do sistema utilizado.

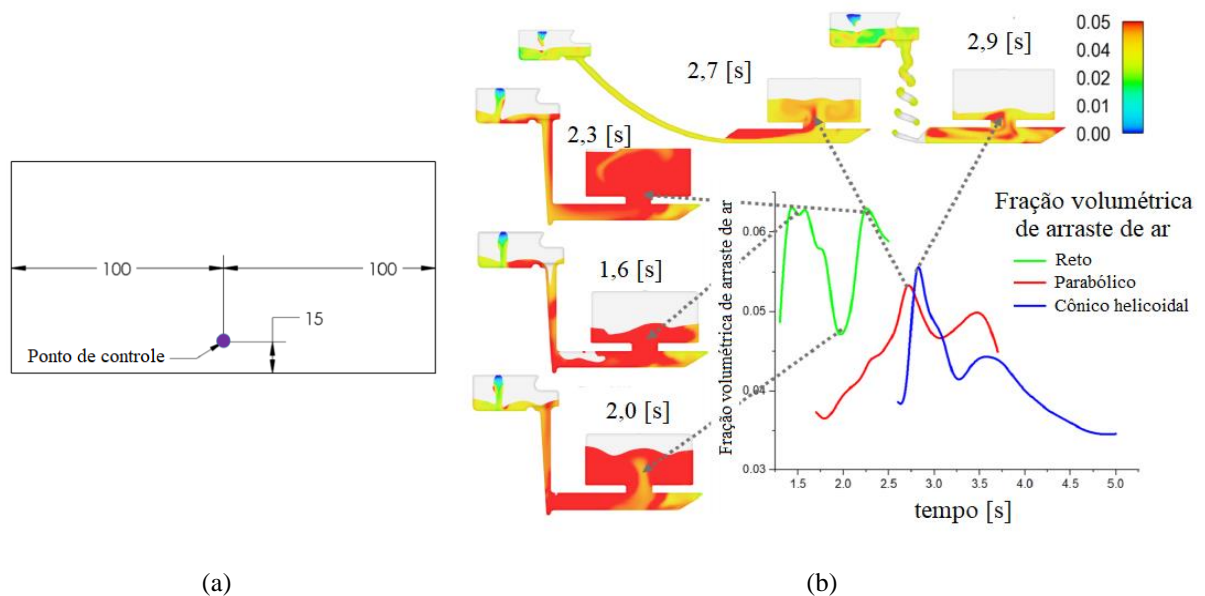


Figura 37 – Comparação da fração do volume de ar arrastado (a) medida por um ponto de controle em um local idêntico para todas os 3 (três) distintos sistemas de enchimento e (b) análise gráfica de fração volumétrica e arrasta de ar em função do tempo para os diferentes sistemas estudados [38]

Quatro corpos de provas para ensaio de flexão nas medidas de 60 x 12 x 4,25 milímetros e um para realização da microestrutura conforme demonstrado na Figura 38 foram retirados de cada peça fundida para avaliação comparativa [38].

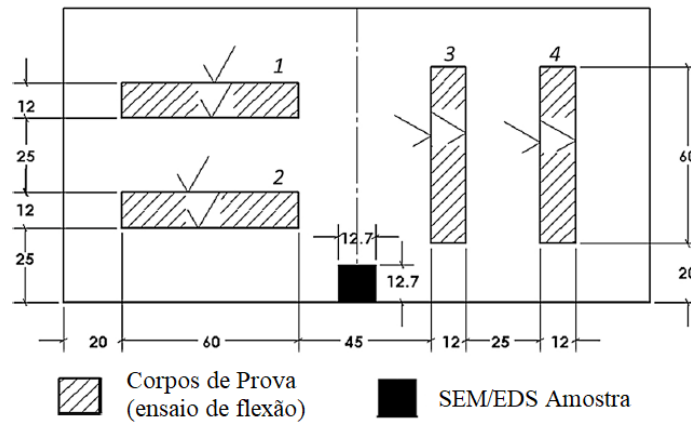
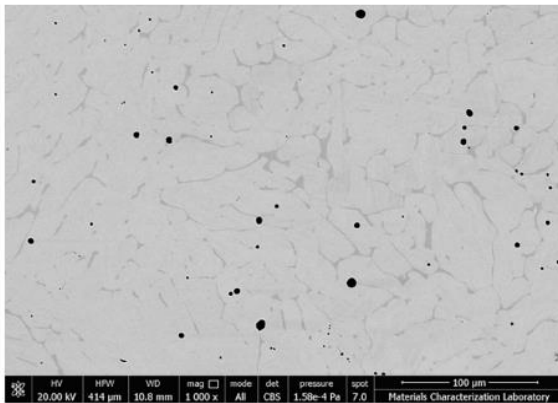
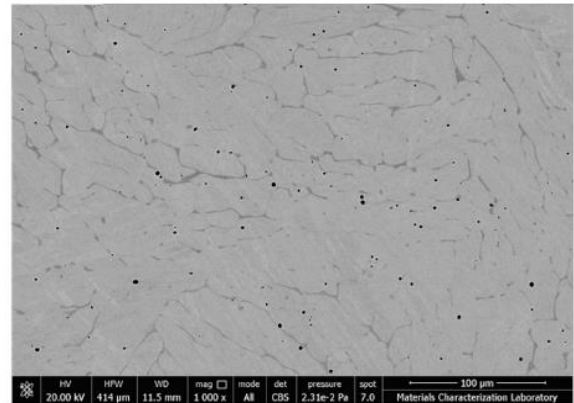


Figura 38 - Localização de quatro corpos de prova (60x12x4,25 mm) e uma amostra para realização da microestrutura SEM/EDS [38]

A análise microestrutural demonstrada na Figura 39 indicou as inclusões obtidas decorrentes dos diferentes projetos de fundição. O sistema cônico helicoidal (Figura 39c) foi o que apresentou menor número de inclusões, posteriormente na Figura 39d é comparado o percentual da área ocupada por inclusões de cada sistema utilizado, foi observado uma redução de 35% e 21% para o sistema cônico helicoidal e parabólico respectivamente em comparação ao sistema de canais reto [38].



(a)



(b)

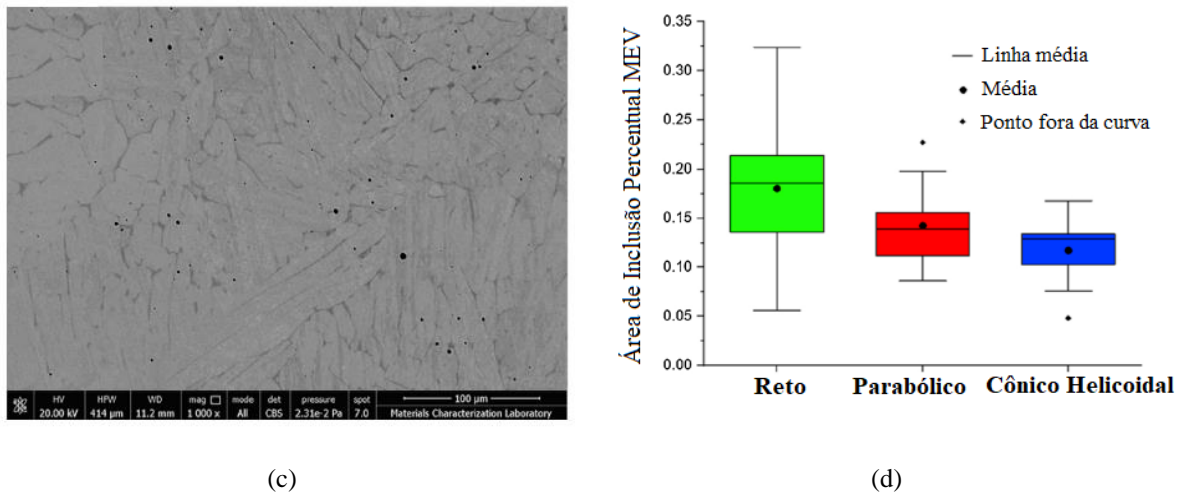


Figura 39 – Análise de inclusões oriundas de diferentes sistemas de canais (a) canal reto, (b) canal parabólico, (c) canal cônico helicoidal e (d) comparação percentual de inclusões sobre a área da microestrutura [38]

A resistência a flexão final das três peças fundidas foi resumida na Figura 40, os resultados indicaram que o sistema cônico helicoidal mostra um aumento na resistência à flexão de 8,4% quando comparado ao canal reto [38].

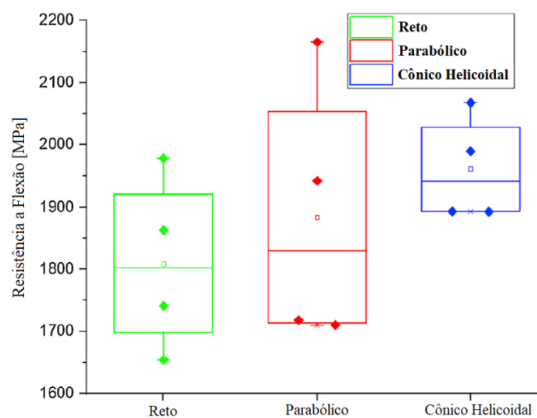


Figura 40 – Resistência à flexão para diferentes sistemas de enchimento [38]

2.4.7 Comparativo superficial entre simulação e prática

Análise de inclusões realizadas por Majidi [14] demonstram as mesmas em ferro fundido dúctil dependem do tipo de sistema de enchimento utilizado. A Figura 41 demonstrou os sistemas de enchimento comumente utilizados para ferro e aço. A Figura 41a a configuração denominada como “sistema A”, a Figura 41b denominada “sistema B”, a Figura 41c denominada “sistema C” e o gráfico da Figura 41d demonstrou o comparativo da taxa de arraste volumétrica de ar no aço (Q_a/Q_s).

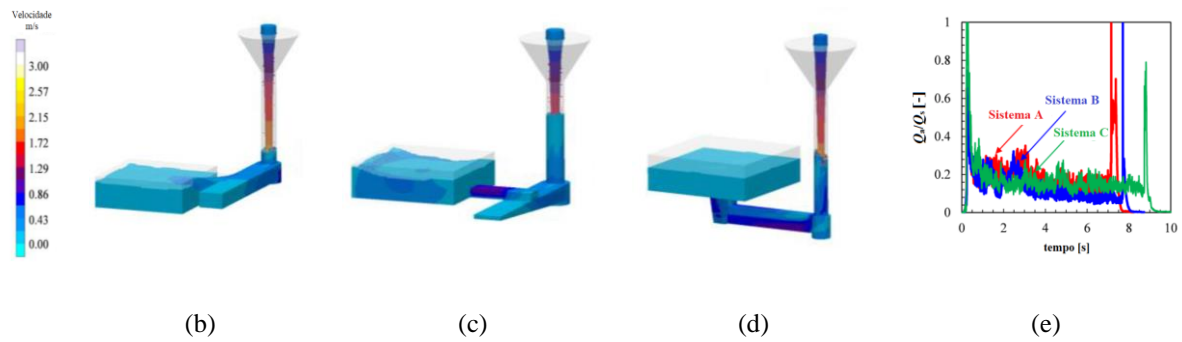


Figura 41 – Diferentes sistemas de enchimento (a) sistema A, (b) sistema B, (c) sistema C e (d) taxa de arraste volumétrica de ar no aço [14]

O sistema utilizado na Figura 41a demonstrou um ataque lateral com queda do metal líquido na entrada da cavidade do molde (efeito cachoeira), a Figura 41b com canal de distribuição em formato de cunha e ataque lateral pela parte inferior, na Figura 41c com ataque inferior por baixo (ataque tipo cachimbo) e o gráfico da Figura 41d demonstrou a taxa de arraste volumétrico de ar no aço para os diferentes sistemas analisados. A Figura 42a refere-se a prática de fundição do “sistema A”, a Figura 42b para o “sistema B” e a Figura 42c para o “sistema C”.⁴

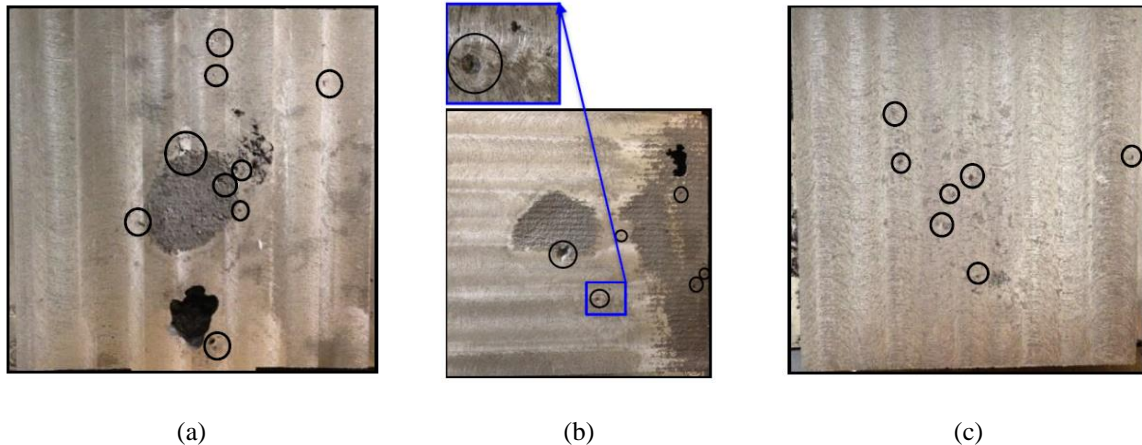


Figura 42 – Superfície após usinagem de 2,5 milímetros de profundidade (a) sistema A, (b) sistema B e (c) sistema C [14]

A Figura 42 demonstrou os resultados da superfície superior após processo de fresagem com profundidade de 2,5 mm. Comparando os resultados não foi possível observar diferenças significativas, isso pode ser devido à dimensão da peça projetada/fundida que resultou em tempos de enchimento inferiores a 10 segundos, tempo este que pode não ser suficiente para a formação de inclusões no ferro [14].

Estudos de Melendez, Carlson e Beckermann [4] avaliaram a formação de inclusões e a probabilidade de localização das mesmas na geometria final do componente fundido, por

prática de fundição em análise de 30 amostras. A Figura 43 demonstra diferentes momentos do processo de enchimento, sendo a Figura 43a o início do processo e a Figura 43b após o término do enchimento.

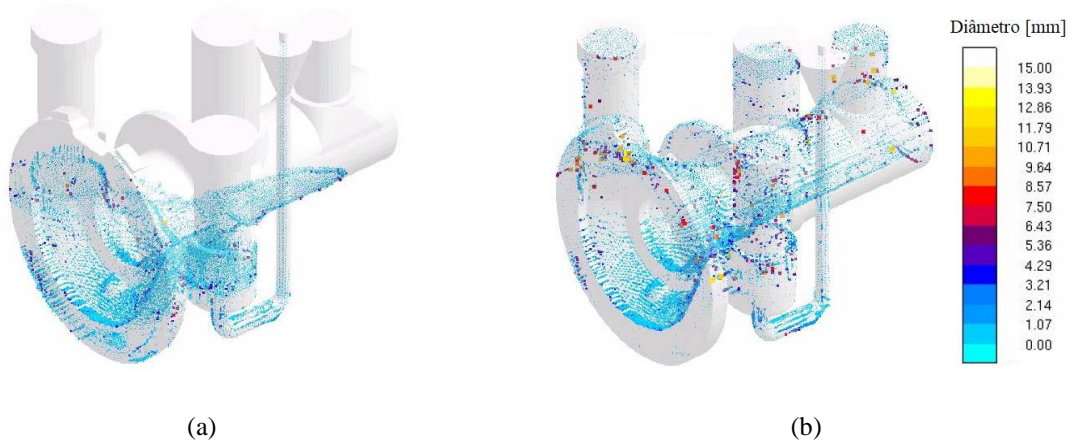


Figura 43 – Resultados de inclusão (a) enchimento parcial e (b) enchimento completo [4]

Resultados experimentais foram plotados na Figura 44a com análise de 30 amostras por meio diagramas de concentração de inclusões após o processo de usinagem, sendo estes digitalizados em uma peça com a probabilidade de 0 até 1 ao aparecimento das mesmas, os resultados de fração de inclusão por área foram mostrados com aglomerações de 5 mm (Figura 44b) e 10 mm (Figura 44c) [4].

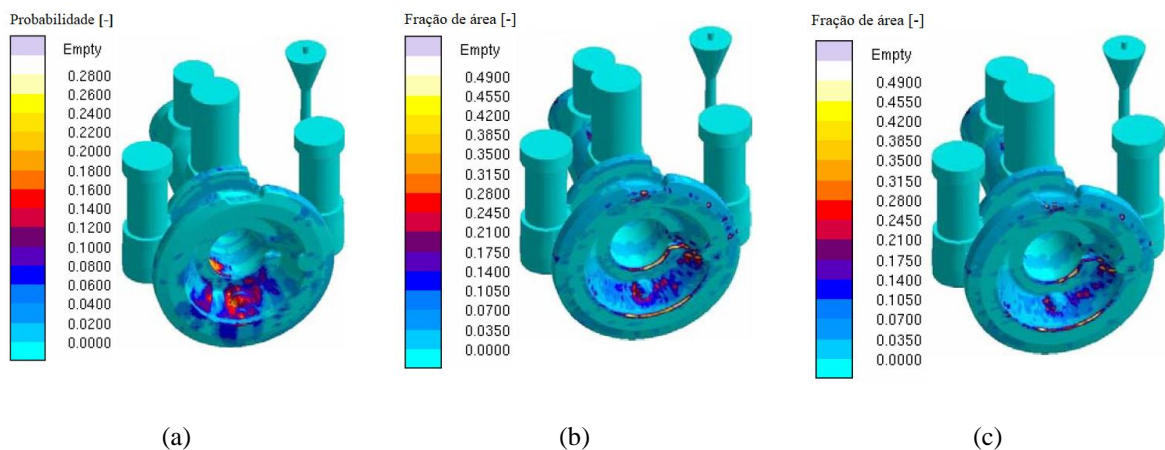


Figura 44 – Distribuição de inclusões medidas e previstas (a) gráfico de probabilidade de inclusão experimental, (b) resultado da simulação da fração de área de inclusão usando aglomeração de 5mm e (c) utilizando aglomeração de 10 mm [4]

Comparando os resultados da simulação com o resultado experimental da Figura 44a, as distribuições de inclusões nas simulações estão em concordância, em particular, a região com maior probabilidade [4].

A Figura 45 demonstrou os resultados da simulação que prevê a localização final de inclusões na fundição de um corpo de prova tipo placa em estudos de Carlson e Beckermann [47].

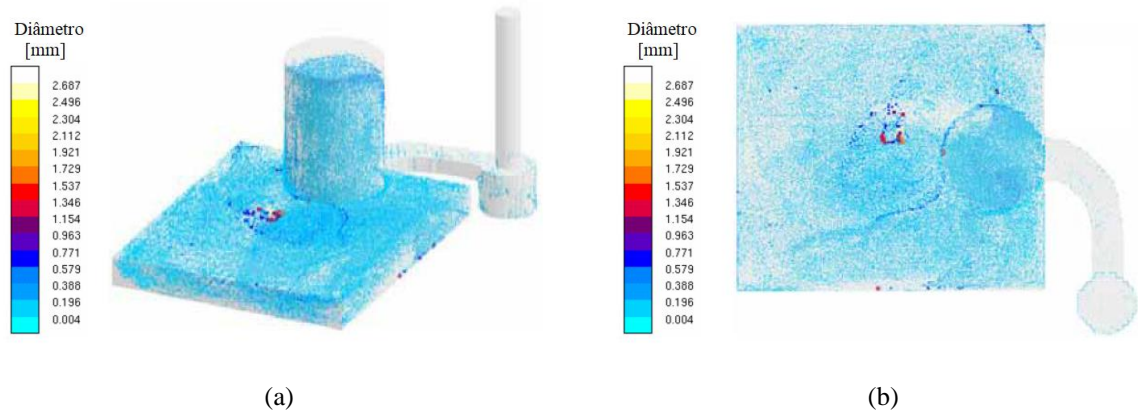


Figura 45 – Simulação do processo de fundição (a) vista isométrica e (b) vista superior dos locais finais de inclusão [47].

Pode-se observar após o processo de enchimento o posicionamento final das inclusões, previstas na superfície da placa, que qualitativamente concordaram com o resultados da prática de fundição demonstrados na Figura 46 [19].



Figura 46 – Comparação entre simulação e resultados experimentais, vista superior dos locais finais de inclusão em prática de fundição após usinagem [47]

A Figura 46 demonstrou a distribuição das inclusões para 2 (duas) práticas de fundição realizadas, resultados do estudo mostram que a maioria das inclusões produzidas possuem característica arredondadas com diâmetro final de até 0,1 milímetros, com baixo número de inclusões maiores que 0,5 milímetros e pico de inclusões com tamanho máximo até 0,2 milímetros [47].

No processo de simulação de fundição é possível avaliarmos a formação das inclusões, crescimento, aglomeração e movimento, avaliando assim o posicionamento final das mesmas no produto fundido, dependentes do sistema de enchimento projetado [19].

O material definido para prática de fundição foi o aço baixa liga de alta resistência G42CrMo4 (1.7231), que possui aplicabilidade em escala industrial e normalmente é submetido a esforços mecânicos, nos quais defeitos de reoxidação possam comprometer o desempenho final obtido.

2.4.8 Características do aço baixa liga de alta resistência G42CrMo4 (1.7231)

A composição química do material de acordo com a norma DIN EN 10292 foi demonstrada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço G42CrMo4 (1.7231)

G42CrMo4 (1.7231)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Máx	0,380	-	0,600	-	-	0,800	0,150
Mín	0,480	0,600	1,000	0,025	0,020	1,200	0,300

Pela norma DIN EN 10292 o procedimento de tratamento térmico pode ser realizado de duas diferentes formas para espessuras inferiores a 100 milímetros, sendo elas QT1 ou QT2, para este estudo foi definido a realização do processo de acordo com as especificações QT1, que terá seu processo detalhado no procedimento metodológico. Os procedimentos de tratamento são demonstrados na Tabela 2 assim como as propriedades mecânicas para o aço baixa liga de alta resistência G42CrMo4 (1.7231).

Tabela 2 - Tratamento térmico para o aço baixa liga G42CrMo4 (1.7231)

G42CrMo4 (1.7231)								
Denominação	Tratamento Térmico		Espessura t [mm]	Propriedades Mecânicas			Teste de Impacto	
	Normalização ou Austenitização [°C]	Têmpera [°C]		Teste de tração à temperatura ambiente			KV [J] mín	Temperatura [°C]
				R _p 0,2 [Mpa] mín	R _m [Mpa]	A [% mín]		
+ QT1	880 - 950	600 - 650	t ≤ 100	600	800 - 950	12	31	Ambiente
			100 < t ≤ 150	550	700 - 850	10	27	Ambiente
			150 < t ≤ 250	350	650 - 800	10	16	Ambiente
+ QT2	880 - 950	550 - 600	t ≤ 100	700	850 - 1000	10	27	Ambiente

Segundo Henschel e Kruger [48] após tratamento térmico a microestrutura do material G42CrMo4 consiste em martensita temperada como mostrado na Figura 47.

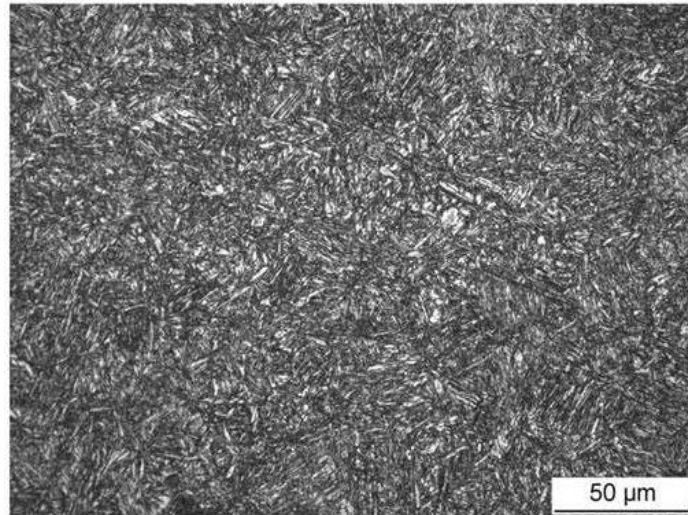


Figura 47 – Microestrutura do aço G42CrMo4, martensita temperada

A viscosidade do material G42CrMo4 é apresentada Figura 48 em função da temperatura. Dados retirados do software MAGMASOFT® indicam a tensão superficial do material de 1,49 N/m, temperatura de solidificação de 1394°C e líquido de 1490°C.

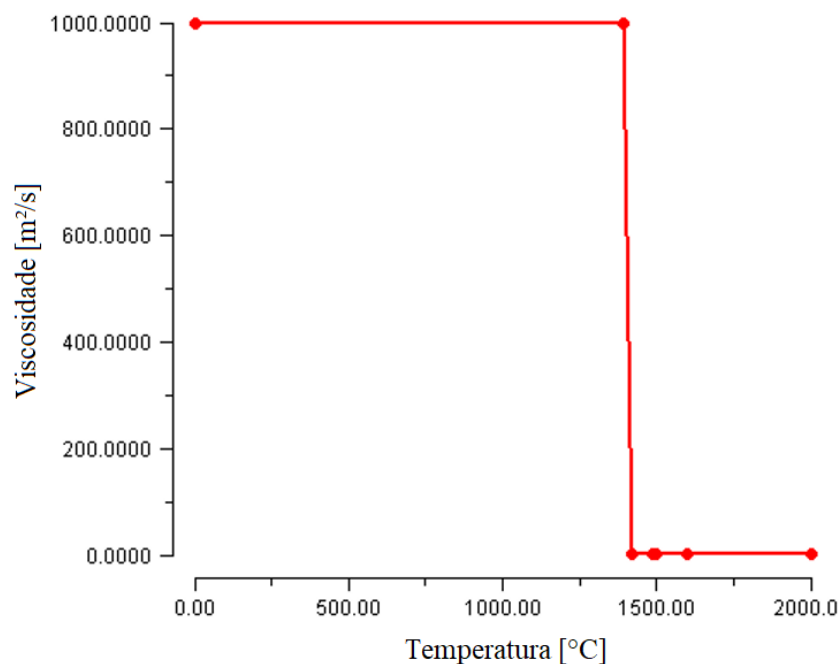


Figura 48 – Viscosidade em função da temperatura para o material G42CrMo4 (MAGMASOFT®)

Em estudos de Henschel, Dudczig, Kruger e Aneziris [49] foi avaliada a influência de inclusões não metálicas na tenacidade do aço baixa liga de alta resistência G42CrMo4 (1.7231). A Figura 49a demonstrou a aglomeração de inclusões de alumina com concentração na parte externa da geometria estudada (cilindro) e a Figura 49b mostra a região com maior concentração destas inclusões com maior ampliação (500μm).

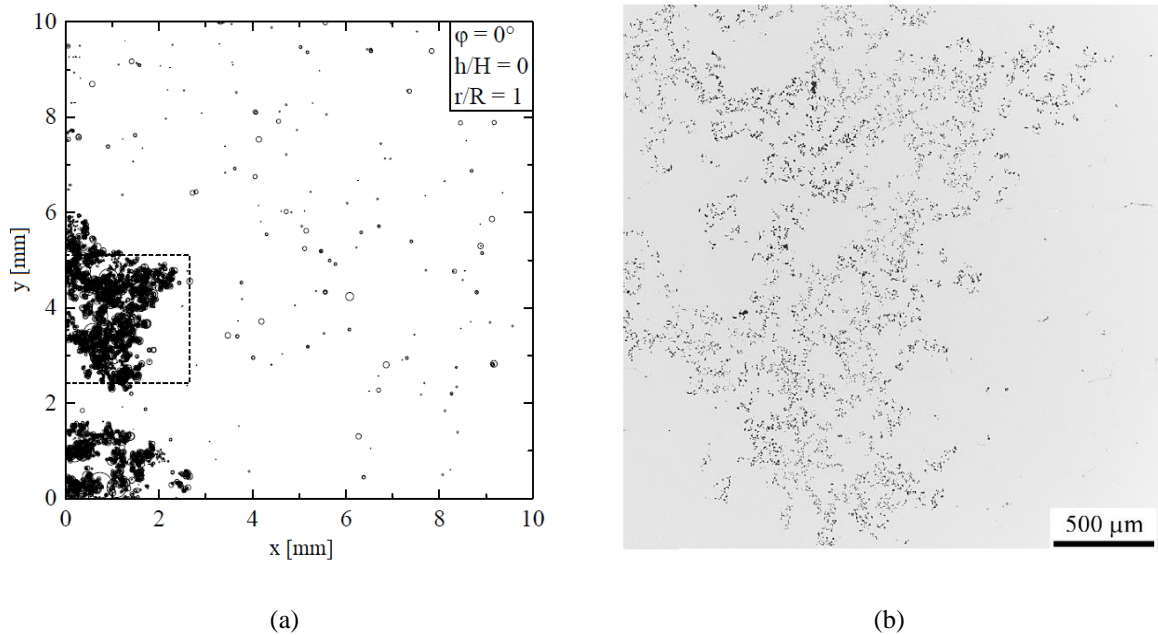


Figura 49 – Micrografia do aço G42CrMo4 (1.7231) (a) inclusões aglomeradas de alumina e (b) detalhe da aglomeração na região demarcada [49]

Conforme demonstrado nas Figura 49a e Figura 49b as inclusões não metálicas tendem a se aglomerar na superfície do componente fundido (de 0 a 2 milímetros da superfície externa para o núcleo) [49]. O comportamento das inclusões não metálicas desta liga pode ser analogamente comparado com estudos de Love, Pettit e Messenger [34] detalhados na referência bibliográfica deste estudo.

Levando em consideração que uma restrição é imposta as inclusões não metálicas quando as mesmas entram em contato com a parede do molde em componentes fundidos é esperado que maiores concentrações se encontrem sempre na superfície dos componentes fundidos, principalmente nas superfícies laterais e superiores [49].

Em análise de uma superfície fraturada conforme demonstrado na Figura 50a inclusões no aço G42CrMo4 foram detalhadas na Figura 50b, desta forma, quanto maior o volume de aglomerados de inclusões maior a tendência a fragilização local do componente [49].

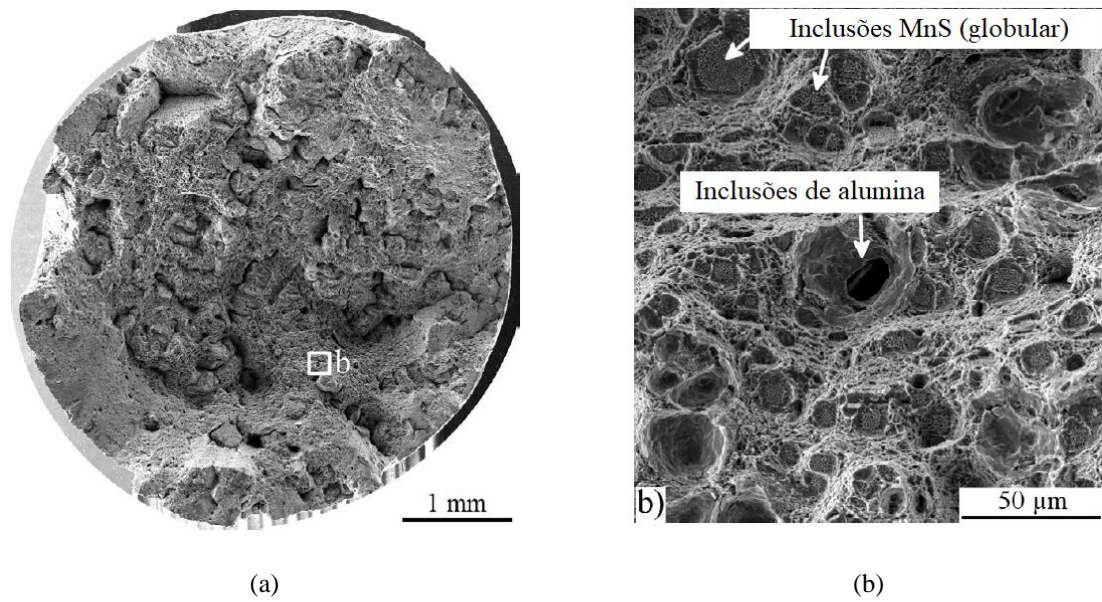


Figura 50 – Detalhe de fratura em ensaios (a) detalhe superficial da fratura e (b) inclusões observadas na fratura [49]

Estudos de Henschel e Kruger [50] demonstraram que inclusões não metálicas afetam diretamente o caminho das fissuras em ensaios mecânicos do aço baixa liga de alta resistência G42CrMo4. Aglomerados de inclusões promoveram a deflexão pontual, desta forma a fissura foi desviada no sentido das inclusões não metálicas, demonstrando a influência das mesmas no comportamento final do componente fundido.

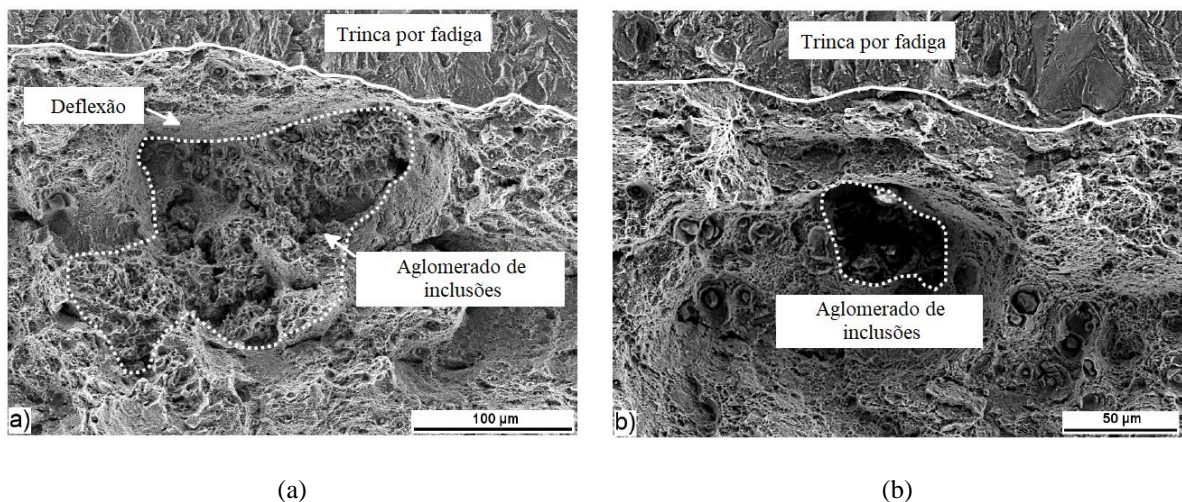


Figura 51 – Aglomerados de inclusão (a) aço G42CrMo4 composição A e (b) aço G42CrMo4 composição B [50]

As informações demonstradas na fundamentação teórica deste estudo serviram como base para o seu desenvolvimento, englobando projeto, processo e conhecimento prévio do material a ser analisado.

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento metodológico na interpretação de dados obtidos via Simulação Numérica do Processo de Fundição de Metais – SNPFM, por meio do *software* MAGMASOFT[®], utilizando os módulos MAGMAstandard[®] e MAGMAsteel[®] (módulo específico da tecnologia de SNPFM), correlacionados ao projeto e processo de sistemas de fundição por gravidade, validando-os pela prática de fundição.

Para análise comparativa/quantitativa entre diferentes sistemas de enchimento uma metodologia capaz de promover a compreensão dos mecanismos de formação de reoxidação e correlacionar os resultados com a prática se mostra necessária, a fim de que estes possam ser imediatamente aplicados em *designs* subsequentes no desenvolvimento de um componente fundido.

Desta forma este estudo visa o desenvolvimento da metodologia de análise de reoxidação por meio da avaliação da interface líquido-ar pelo conhecido no processo de simulação numérica do processo de fundição de metais como superfície de metal exposta ao ar [-] e também pelo percentual de aprisionamento de ar [%] no componente final. O resultado de velocidade [m/s] média nos canais de ataque foi adicionado para correlação de velocidade do metal líquido com exposição superficial do metal líquido ao ar [-] e aprisionamento de ar [%].

Inicialmente a validação da metodologia a ser aplicada foi realizada de forma comparativa reproduzindo o estudo “Comparativo de Ponto de Ataque - Pressurizado” do estudo de Majidi [14].

Após validação dos resultados obtidos por simulação numérica um corpo de prova (CP) foi projetado visando a comparação entre simulação e prática de fundição por meio de diferentes ensaios.

Em uma segunda etapa do processo de SNPFM foram avaliados os resultados específicos de reoxidação disponíveis na versão do MAGMAsteel[®] do MAGMASOFT[®], sendo eles inclusão por área [%] e inclusão por volume [%].

A panela utilizada para realização da prática de fundição foi a com vazamento pelo fundo (panela de válvula) a fim de não promover inclusões de escória e proporcionar taxa e fluxo com maior similaridade entre as fundições dos CP's.

Desta forma, após projetos analisados pela metodologia proposta e validada, quatro conceitos foram definidos, visando resultados extremos e espaçados para prática de fundição e correlação entre simulação e prática. Após o acompanhamento do processo de fundição,

tratamento térmico e usinagem dos corpos de prova, as seguintes análises e ensaios foram realizados:

- A. Análise visual comparativa (qualitativamente e quantitativamente) por ensaio de líquido penetrante (ASTM E 165 – 2012 – *Standard Practice for Liquid Penetrant Inspection Method*);
- B. Análise da característica das indicações por microscópio digital;
- C. Análise metalográfica (comparativa);
- D. Ensaio mecânico de tração (ASTM E8/E8M – 09 – *Standard Test for Tension Testing OF Mettalic Materials*);
- E. Ensaio mecânico de impacto (ASTM E23 – 07a^{e1} – *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testting of Metallic Materials¹*);
- F. Análise MEV e EDS

Após definição das etapas a serem realizadas no estudo o processo iniciou-se pela parametrização da metodologia de análise a ser realizada, reproduzindo um estudo já realizado, para que os projetos possam ser avaliados de forma correta antes da definição da prática de fundição.

3.1 PARAMETRIZAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE

Levando em conta o referencial bibliográfico deste estudo é observado que a análise de reoxidação deve ser realizada de duas formas distintas (duas etapas), sendo a primeira delas: a avaliação dos mecanismos de formação de reoxidação e a segunda (específica): previsão de localização e volume de inclusões de reoxidação.

Desta forma, inicialmente tornou-se necessário a realização de um estudo para validar, caracterizar e possibilitar a comparação entre resultados dependentes do projeto de sistema de enchimento para análise de reoxidação, realizado reproduzindo a simulação de “Comparativo de Ponto de Ataque - Pressurizado” do estudo de Majidi [14], o dimensionamento do corpo de prova citado é demonstrado na Figura 52.

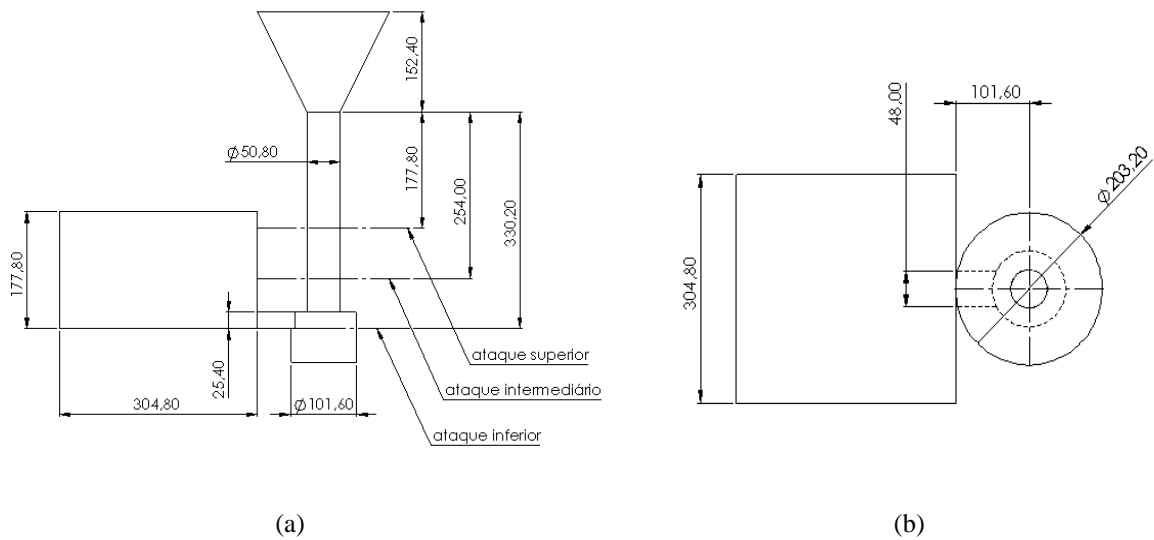


Figura 52 - Corpo de prova (a) vista lateral e (b) vista superior. Adaptado de Majidi [14]

Os resultados obtidos no estudo citado foram demonstrados na Figura 29. Os parâmetros para reprodução do estudo foram retirados do mesmo, os principais deles além da idêntica geometria do corpo de prova reproduzida na Figura 52 são a taxa de vazão de 1000 cm³/s e a altura de queda de 203,2 mm. O material utilizado reprodução do estudo foi o aço G40NiCrMo4 do banco de dados do MAGMASOFT®.

A Figura 53 demonstra o resultado de velocidade com 25% do enchimento realizado com escala de 0 a 3 m/s, para simulação comparativa de validação reproduzindo a simulação de “Comparativo de Ponto de Ataque - Pressurizado” do estudo de Majidi [14].

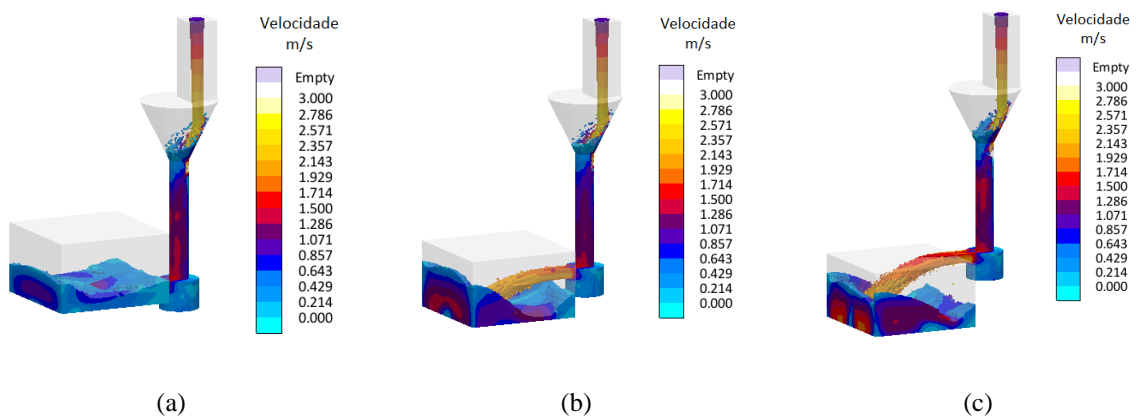


Figura 53 - Velocidade do MAGMASOFT® (a) ataque lateral inferior, CP01, (b) ataque lateral intermediário, CP02 e (c) ataque lateral superior, CP03

Analisando o resultado visual de velocidade do MAGMASOFT® com 25% do enchimento, foi possível visualizar a forma construtiva do sistema de canais além de uma das

etapas mais críticas e com alta influência no processo de enchimento, que é o perfil de fluxo do metal líquido na entrada da cavidade do molde. Os objetivos definidos do MAGMASOFT® vem para quantificar a análise visual do processo.

Para avaliação da primeira etapa do projeto foi utilizado o *software* MAGMASOFT®, sendo a metodologia aplicada demonstrada em caráter visual do resultado de velocidade [m/s] e aprisionamento de ar [%], sendo os dados absolutos demonstrados em resultados gráficos do número adimensional da superfície de metal exposta ao ar (máximo de superfície livre – volume por fluido) para canais (VOF – Canais) e peça (VOF – Peça), aprisionamento de ar [%] médio no produto final e velocidade média [m/s] na região de ataque do sistema de canais durante o processo de enchimento.

Definiu-se a separação da análise de superfície de metal exposta ao ar (máximo de superfície livre – volume por fluido) entre canais (VOF – Canais) e peça (VOF – Peça) para avaliação individual e posteriormente somados (VOF – Total).

Máximo de Superfície Livre – Volume por Fluido (*Max Free Surface – Volume of Fluid*) é um número adimensional que caracteriza a relação entre o total da superfície de metal exposta ao ar, dependente do volume de fluido durante o processo de enchimento. Este resultado significa que um maior valor acarreta um sistema mais turbulento, com maior área de contato com o ar, conseqüentemente, um menor valor indica um enchimento com menor exposição do metal líquido ao ar (menos turbulento). Desta forma, quanto menor o valor obtido, menor será o contato do metal líquido com o ar e conseqüentemente menor reoxidação do metal líquido durante o processo de preenchimento da cavidade do molde.

O resultado de superfície de metal exposta ao ar [-] não deve ser confundido com o resultado de aprisionamento de ar [%], pois este refere-se à criação de bolsas de ar quando as frentes de metal líquido convergem umas sobre as outras ou sobre uma parede do molde, podendo ocorrer devido a sistemas de enchimento mal projetados ou quando o molde não possui saídas de ar ou impermeabilidade suficientes [42].

O resultado de velocidade [m/s] é a média com que o metal líquido passa pela região do ponto de ataque do sistema, durante o tempo de enchimento da cavidade do molde (considerando peça e massalote de alimentação).

Para avaliação da segunda etapa foi utilizado o *software* MAGMASOFT® com a utilização do módulo MAGMAsteel® (módulo específico da tecnologia de SNPFM), sendo os resultados apresentados em caráter visual do resultado de diâmetro, localização e aglomeração de inclusões [mm] e percentual de inclusão por área [%], sendo os dados absolutos

demonstrados em resultados gráficos de inclusão por área [%] e inclusão por volume [%], resultados estes que consideram apenas a geometria da peça (componente final fundido).

Os valores percentuais para a área de inclusões [%] e volume de inclusões [%] foram demonstrados de forma gráfica para efeito comparativo entre resultados e correlacionados com os dados obtidos na etapa primeira etapa. É importante ressaltar que o *software* MAGMASOFT® realiza a média de inclusões em área e volume em cada célula (tamanho da malha dimensionada para simulação) de metal para o ID (*identity*) definido de avaliação, neste estudo foi definido a peça como área a ser avaliada sendo que o ID selecionado foi o “*Casting ID 1*”.

Para projeção dos gráficos demonstrados neste estudo, 6 (seis) objetivos foram implantados dentro do MAGMASOFT®, sendo A, B e C referentes a etapa 01 (MAGMAstandard®) e D e E referentes a etapa 02 (MAGMAsteel®).

- A. Minimizar o máximo de superfície livre – Volume por fluido:
 - a. VOF - Canais (bacia de vazamento, canal de descida, canal de distribuição e ataque) [-];
 - b. VOF - Peça [-];
- B. Aprisionamento de ar [%];
- C. Velocidade média dos canais [m/s];
- D. Inclusão por área [%];
- E. Inclusão por volume [%];

Desta forma o primeiro gráfico (etapa 01) foi definido contemplando os objetivos Aa, denominado como VOF – Canais [-], o objetivo Ab como VOF – Peça [-], o objetivo B como Aprisionamento de ar [%] e o C como Velocidade [m/s]. Os objetivos Aa e Ab foram disponibilizados no eixo primário e os objetivos B e C no eixo secundário.

Em componentes fundidos de alta performance torna-se necessário definir regiões críticas, os resultados de reoxidação oriundos da SNPFM no MAGMAsteel® deste trabalho buscaram definir as regiões em que haverá concentração das inclusões de reoxidação, pela simulação numérica do processo de fundição e validadas experimentalmente, a fim de que possam estes resultados serem replicados no desenvolvimento de componentes fundidos.

Para todas as gerações de simulações realizadas neste estudo os resultados visuais de reoxidação em diâmetro, localização, aglomeração (estes em única imagem) e percentual de

inclusão por área [%] serão demonstrados a fim de serem passíveis de comparação visual com a prática de fundição.

Após validação da metodologia de análise de resultados (e entre os mesmos) um corpo de prova foi projetado para análise de diferentes conceitos de sistemas de enchimento, que proporcionem além das análises realizadas por simulação numérica a correlação com a prática de fundição.

3.2 DIMENSIONAMENTO DO CORPO DE PROVA

O corpo de prova para este estudo foi dimensionado de acordo com Figura 54, adaptado com base nas literaturas de Campbell [15], Majidi [14] e Sama [38], consideradas na fundamentação teórica deste estudo e projetado para viabilizar a posterior retirada dos corpos de prova (CPs) em experimentos práticos.

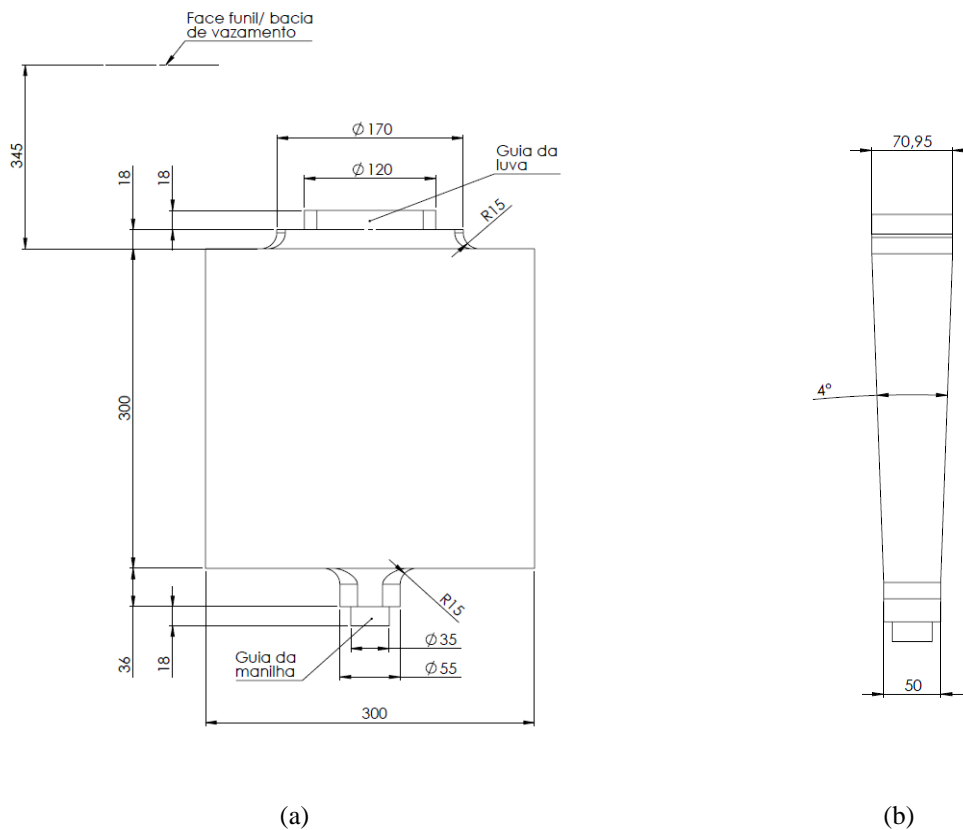


Figura 54 - Dimensionamento do corpo de prova (a) vista frontal e (b) vista lateral

Após projetar o corpo de prova para realização comparativa entre os diferentes conceitos de sistemas de enchimento, os parâmetros utilizados foram implantados dentro da plataforma de simulação (CAE) e os requisitos definidos por Hartmann [41] para projetos de corpos de prova foram avaliados.

3.3 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO POR SNPFM

A fim de validar os três primeiros pré-requisitos definidos por Hartmann [41] a simulação da solidificação do projeto foi realizada para verificar a eficiência do massalote calculado, visando a sanidade total da peça para não influenciar os posteriores ensaios a serem realizados. Desta forma 03 (três) resultados foram avaliados, sendo eles módulo térmico (cm), porosidade [%] e microporosidade [%].

Após validação dos requisitos definidos por Hartmann [41] uma análise da malha foi realizada, de forma que o dimensionamento da mesma não influenciasse os resultados analisados.

3.4 DEPENDÊNCIA DE MALHA

Como pelo menos quatro pontos de avaliação são necessários para resolver numericamente um jato líquido [44], foi avaliado a seção transversal da malha computacional realizada pelo Método de Volumes Finitos (MVF) do MAGMASOFT®, demonstrado na Figura 55, a fim de que o dimensionamento da mesma também não influenciasse nos resultados obtidos no processo de simulação.

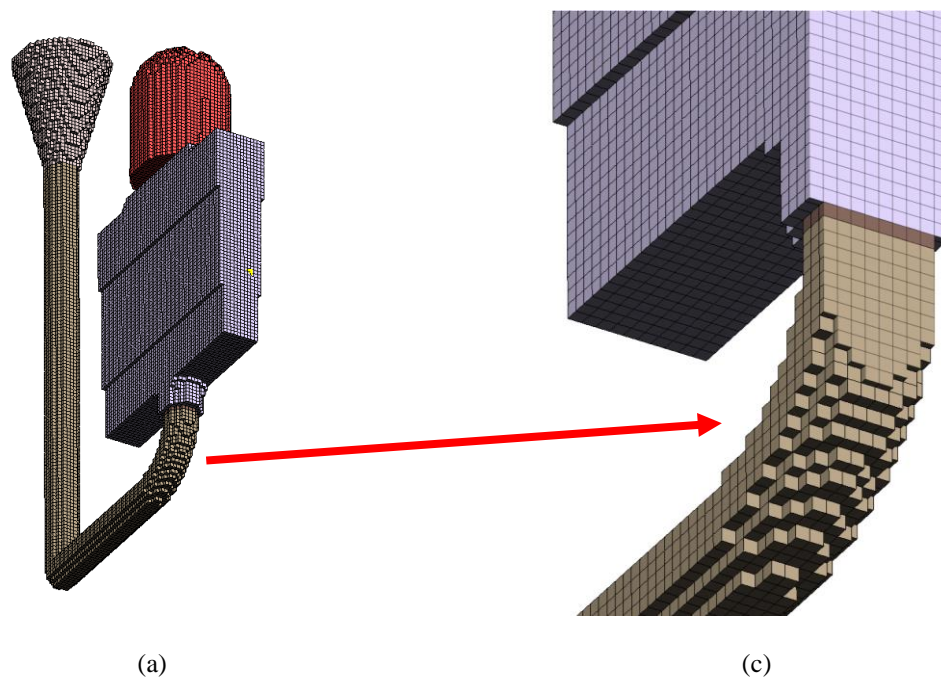


Figura 55 - Análise de malha do MAGMASOFT® com dimensionamento de 5 milímetros de aresta (a) vista isométrica, (b) detalhe região dos canais em corte

Foram definidas as malhas com tamanho de 4 (quatro), 5 (cinco), 6 (seis) e 7 (sete) milímetros de aresta para avaliação dos resultados das simulações realizadas. Diferentes resultados obtidos pela dependência de malha são aceitáveis, considerando um tempo praticável de simulação e que a malha dimensionada não venha influenciar na interpretação resultados obtidos.

3.5 SELEÇÃO DO MATERIAL PARA SNPFM

O material considerado para realização da simulação numérica do processo de fundição foi um aço baixa liga de alta resistência (G40NiCrMo4) disponível do banco de dados do MAGMASOFT® com a composição química conforme Tabela 3, temperatura de vazamento estabelecida em 1585°C e vazamento em molde de areia cura-a-frio (processo de moldagem PEP-SET).

Tabela 3 - Composição química do aço baixa liga de alta resistência G40NiCrMo4

G40NiCrMo4								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Máx	0,400	0,275	0,650	0,035	0,030	0,750	0,200	0,900

Mesmo que as simulações tenham sido realizadas para um aço baixa liga de alta resistência, a mudança deste parâmetro para ligas similares não deve possuir influência nas conclusões finais do estudo, deve-se levar em consideração que o estudo é feito de forma comparativa entre as simulações realizadas e pequenas alterações na composição química não devem possuir alterações significativas nos resultados finais.

A viscosidade do material G40NiCrMo4 foi apresentado Figura 56 em função da temperatura.

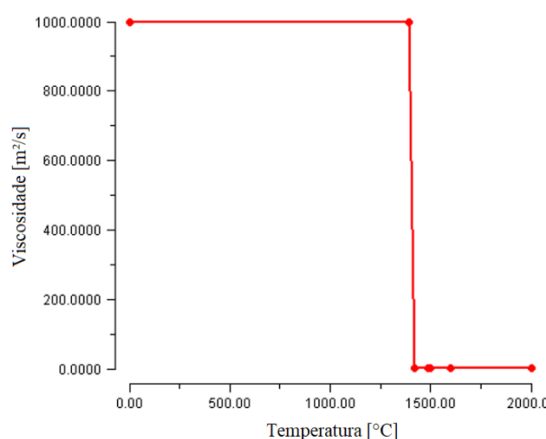


Figura 56 – Viscosidade em função da temperatura para o material G40NiCrMo4 (MAGMASOFT®)

A viscosidade é a propriedade que caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento, portanto, quanto maior a viscosidade menor será a velocidade com que o fluido se movimenta. A temperatura definida para o processo de vazamento (1585°C) está na região com viscosidade 0 (zero), bastante acima de sua fase transiente, desta forma, em todo o processo de enchimento não é observada alteração desta característica.

3.6 TEMPO DE ENCHIMENTO E ANÁLISE DE VAZÃO

Para se projetar sistemas de enchimento é necessário o conhecimento sobre as taxas de vazão aplicadas no processo de vazamento do metal líquido, é importante o controle da taxa de vazão pelo operador da panela, levando em consideração que o funil de vazamento não deve ser esgotado, mas sempre que possível, se manter o máximo possível cheio.

O *software* MAGMASOFT®, prevê diferentes taxas de vazão para uma mesma configuração de panela, sendo possível parametrizar este valor “coeficiente de descarga” ou “*discharge coefficient*” conforme mostrado na Figura 57, quanto mais próximo ao valor de 1.0 (um) maior o fluxo de vazão da panela parametrizada (sendo 1.0 o fluxo máximo), consequentemente um menor tempo de enchimento da cavidade do molde.

Para realização deste estudo foram fundidos 4 (quatro) corpos de prova em sequência, com peso estimado total de 420,00 (quatrocentos e vinte) kg, desta forma foi programado a utilização de uma panela com capacidade de 1000,00 (um mil) kg com 600,00 (seiscentos) kg de metal líquido, com coeficiente de descarga estabelecido em 0.5 (fator esse usualmente utilizado na fundição para esse volume de peça), sendo as características gerais da panela demonstradas na Figura 57.

Ladle Description and Calculation Parameters						
Ladle	Ladle Geometry		Wait Time (s)	Calculation Parameters		
001	Capacity	1000.0 kg	0.0	Amount of melt in ladle	600.0 kg	
	Ladle diameter	500.0 mm		Current part to cast	1	
	Nozzle diameter	35.0 mm		Distance from ladle to inlet	150.0 mm	
	Taper	86.0 °		Discharge coefficient	0.5	
				Est. section area of stream at inlet	769.69 mm ²	

Figura 57 - Características da panela utilizada para simulações e prática de fundição

Os dados solicitados pelo *software* foram demonstrados na Figura 57 sobre a Geometria da Panela (*Ladle Geometry*) e Parâmetros de Cálculo (*Calculation Parameters*) são detalhados abaixo.

A. Geometria da Panela (*Ladle Geometry*):

- a. Capacidade da panela [kg];
- b. Diâmetro inferior da panela [mm];
- c. Diâmetro da válvula [mm];
- d. Ângulo de inclinação da panela [$^{\circ}$];

B. Parâmetros de Cálculo (*Calculation Parameters*):

- a. Quantidade metal líquido na panela [kg];
- b. Número da peça na linha de vazamento [uni.];
- c. Distância da panela até o topo do molde [mm];
- d. Coeficiente de descarga do material [-];

A geometria da panela depende do diâmetro (D) pelo ângulo de inclinação (α), é importante salientar que diferentes diâmetros e inclinações levam matematicamente a diferentes relações (diâmetro pela altura) para mesma quantidade de metal líquido, conseqüentemente afetam a taxa de vazão da panela, devido à pressão hidrostática exercida pelo metal líquido no seu interior.

A taxa de vazão calculada para a prática de fundição foi demonstrada na Figura 58. A vazão inicial foi projetada em 1340 (um mil trezentos e quarenta) cm^3/s . O tempo de enchimento total estimado por corpo de prova foi de 7 (sete) à 8 (oito) segundos.

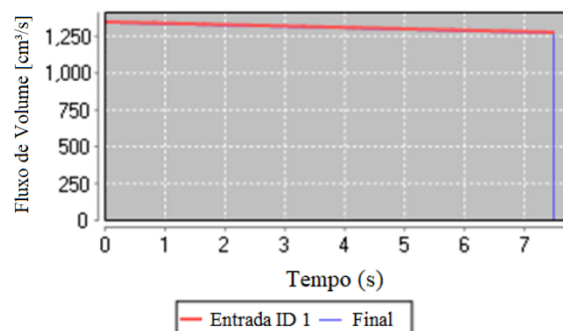


Figura 58 - Taxa de vazão projetada para prática de fundição de acordo com as características da panela

Após definição da metodologia, processos e parâmetros uma análise da configuração base dos projetos de fundição foi realizada.

3.7 CONFIGURAÇÃO DO PROJETO DE FUNDIÇÃO

A Figura 59 demonstra os componentes básicos do sistema de fundição projetado, como bacia de vazamento, canal de descida, canal de distribuição, ataque, peça, base do massalote, massalote de alimentação, respiro e molde.

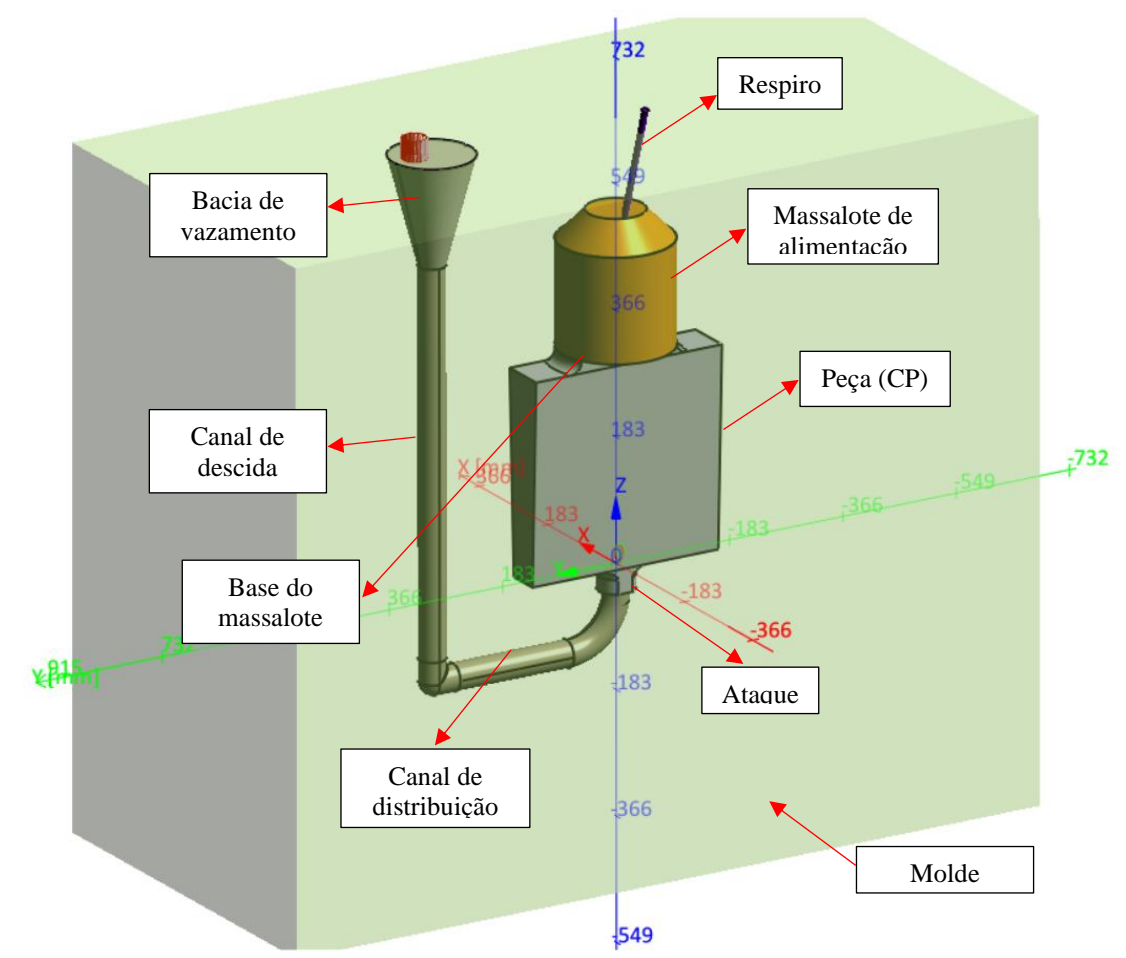


Figura 59 – Detalhamento do projeto de fundição no software MAGMASOFT®

Os sistemas de canais dimensionados neste estudo consideram basicamente uma razão de 1:1:1, salvo exceções de alguns conceitos (CP12 e CP15), mesmo mantendo razão dos sistemas de canais em 1:1:1 foi possível observar que a forma construtiva do sistema de canais afetou o nível de pressurização do sistema.

3.8 ANÁLISE SNPFM DA APLICAÇÃO DE MANILHAS REFROTÁRIAS TIPO COTOVELO OU CURVA

Como visto na fundamentação teórica deste estudo, os sistemas de enchimento pelo fundo possuem viabilidade no processo de fabricação de peças fundidas por gravidade, desta forma um estudo inicial foi realizado comparando possíveis *designs* de simples configuração com sistema de enchimento por baixo, com a utilização de manilhas refratárias comumente chamados de “sistema de enchimento tipo cachimbo”, com alta aplicabilidade em escala industrial.

Sistemas de enchimento de simples configuração utilizando manilhas refratárias tipo curva longa 90° e tipo cotovelo formaram 4 (quatro) possibilidades, sendo elas: cotovelo e curva, curva e cotovelo, curva e curva, cotovelo e cotovelo na transição de queda do metal líquido de vertical para horizontal.

A Figura 60a demonstra uma configuração de projeto com funil de vazamento tipo cônico e sistema de canais retos Ø40 milímetros na queda vertical do metal líquido com utilização de cotovelo e curva longa 90° respectivamente (CP04) para transferência de energia cinética vertical para horizontal, a Figura 60b demonstra a mesma configuração invertendo o posicionamento entre curva e cotovelo (CP05), a Figura 60c demonstra a utilização de 2 (duas) curvas (CP06), a simulação da Figura 60d demonstra a utilização de 2 (dois) cotovelos (CP07).

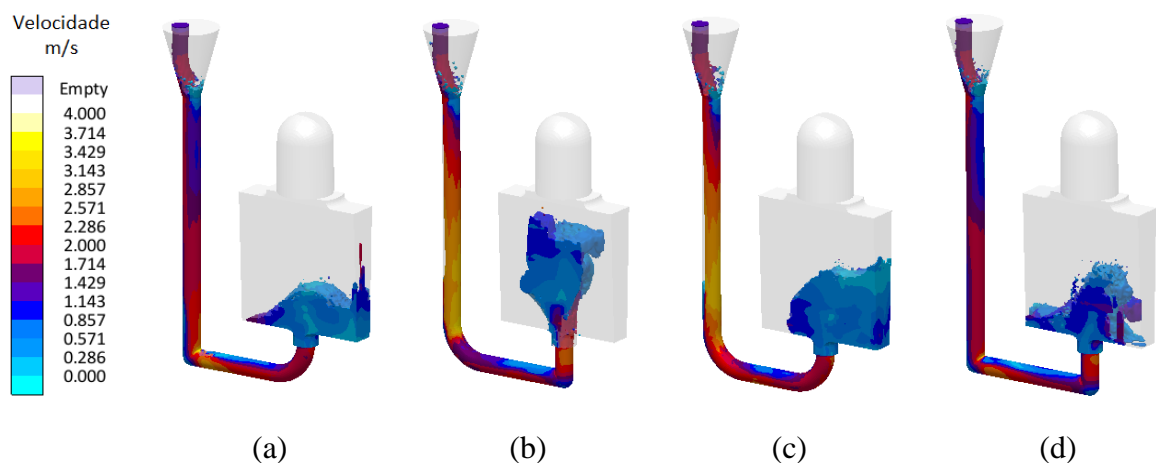


Figura 60 - Velocidade do MAGMASOFT® em 25% de enchimento para geração 01 (a) CP04, (b) CP05, (c) CP06 e (d) CP07

Com os resultados obtidos na geração 01 uma nova simulação foi realizada, levando em consideração o melhor resultado definido pelos objetivos implantados entre a etapa 01 (um) MAGMAstandard® e 02 (dois) MAGMAsteel® do processo de simulação.

3.9 ANÁLISE DE SISTEMAS DE ENCHIMENTO POR SNPFM

Deste ponto em diante, os melhores resultados obtidos nas gerações anteriores, juntos a fundamentação teórica do estudo foram considerados para otimização das gerações subsequentes, caso os mesmos apresentados na geração futura não demonstrassem potencial desejado para redução de defeitos correlacionados a reoxidação, uma nova geração é realizada até se chegar aos melhores resultados possíveis para prática de fundição.

O melhor resultado obtido na geração 01 (comparação entre curvas e cotovelos) foi comparado com o conceito de Campbell [15] demonstrado na Figura 6 e similar a estudos de Majidi e Beckermann [14] demonstrados na Figura 29, devidamente adaptados para o corpo de prova projetado deste trabalho.

A Figura 61a demonstra o sistema de enchimento por baixo, tipo cachimbo (melhor obtido na geração 01 – CP04 - Figura 60a), a Figura 61b demonstra uma configuração de projeto com funil de vazamento tipo cônico, sistema de canais $\varnothing 40$ milímetros e ataque lateral superior (CP08), a Figura 61c com mesma configuração e ataque lateral intermediário (CP09) e a Figura 61d de mesma configuração com ataque lateral inferior (CP10).

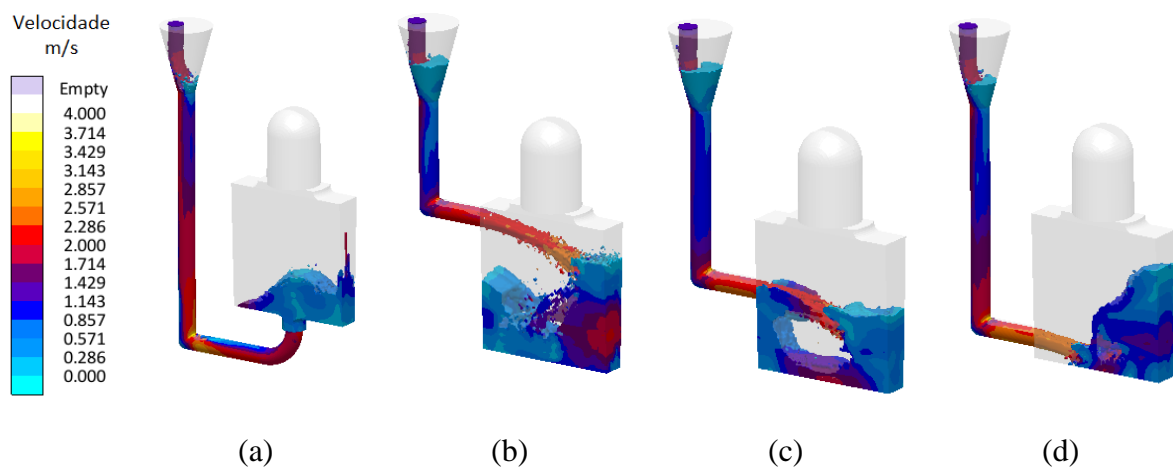


Figura 61 - Velocidade do MAGMASOFT® em 25% de enchimento para geração 02 (a) CP04, (b) CP08, (c) CP09 e (d) CP10

A configuração da Figura 62a demonstra uma bacia de vazamento, conforme projetado por Majidi e Beckerman [44] demonstrado na Figura 31 do referencial bibliográfico, sistema de canais $\varnothing 40$ milímetros e a utilização de cotovelo e curva (CP11), na configuração da Figura 62b foi adicionado uma manilha refratária com $\varnothing 50$ milímetros e restrição de fluxo de $\varnothing 50$ para $\varnothing 40$ no canal de descida (CP12), a configuração da Figura 62c utilizou duas manilhas curvas

com 45° de inclinação para quebra de fluxo no canal de descida (CP13) e a Figura 62d com quebra de fluxo por cotovelos a 90° (CP14).

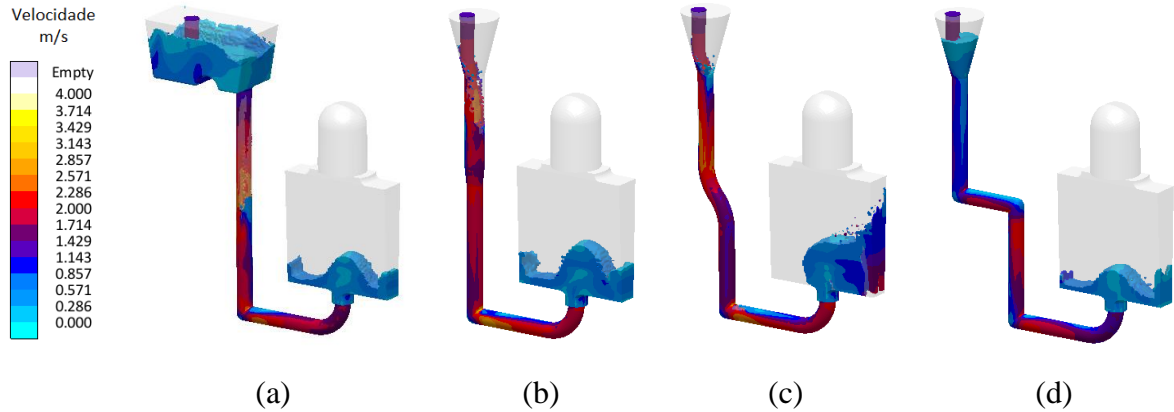


Figura 62 – Velocidade do MAGMASOFT® em 25% de enchimento para geração 03 (a) CP11, (b) CP12, (c) CP13 e (d) CP14

A configuração da Figura 63a foi composta pela quebra de fluxo por cotovelos a 90° e estrangulamento de Ø40 para Ø30 e novamente estrangulador invertido de Ø30 para Ø40 no fluxo horizontal (CP15), na configuração da Figura 63b foi adicionado uma segunda quebra de fluxo por cotovelos a 90° (CP16), a configuração da Figura 63c utilizou uma restrição de fluxo por sistema helicoidal Ø40 com manilhas tipo curva longa 90° posicionadas a 45° de inclinação do eixo horizontal (CP17) e a Figura 63d na mesma configuração do corpo de prova anterior (CP17) com posicionamento das manilhas curvas a 60° em relação ao eixo horizontal (CP18), sendo os sistemas helicoidais propostos para o CP17 e CP18 baseados em estudos de Sama, Badamo, Lynch e Manogharan [38].

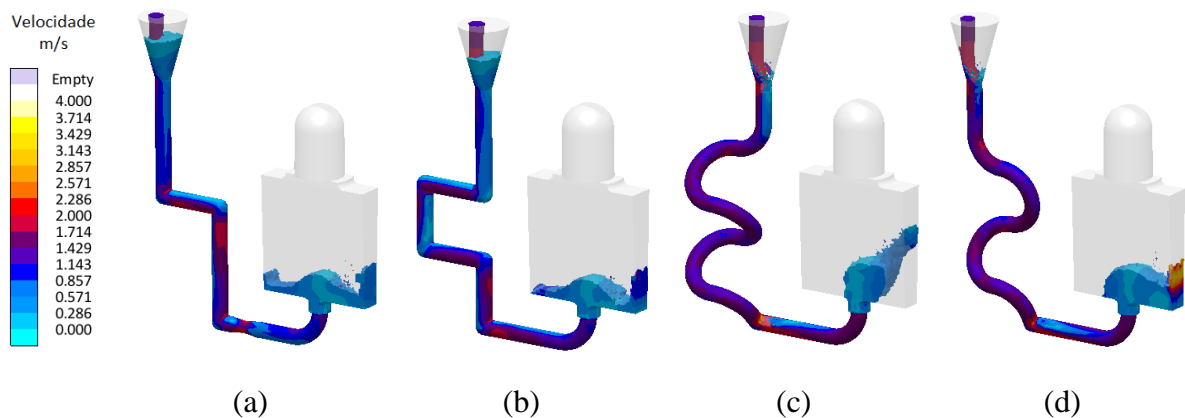


Figura 63 - Velocidade do MAGMASOFT® em 25% de enchimento para geração 04 (a) CP15, (b) CP16, (c) CP17 e (d) CP18

A geração 05 de simulações (Figura 64) demonstra a utilização dos corpos de prova 14, 17 e 18 – CP14, CP17 e CP18 como referência. A configuração da Figura 64a demonstra a quebra de fluxo por curvas longas a 90° (corpo de prova 19 – CP19), na configuração da Figura 64b foi reduzido o número de curvas utilizadas para quatro (corpo de prova 20 – CP20), a configuração da Figura 64c com a utilização de apenas duas curvas a 90° (corpo de prova 21 – CP21) e a Figura 64d com o canal inclinado a 74° do eixo horizontal (corpo de prova 22 – CP22).

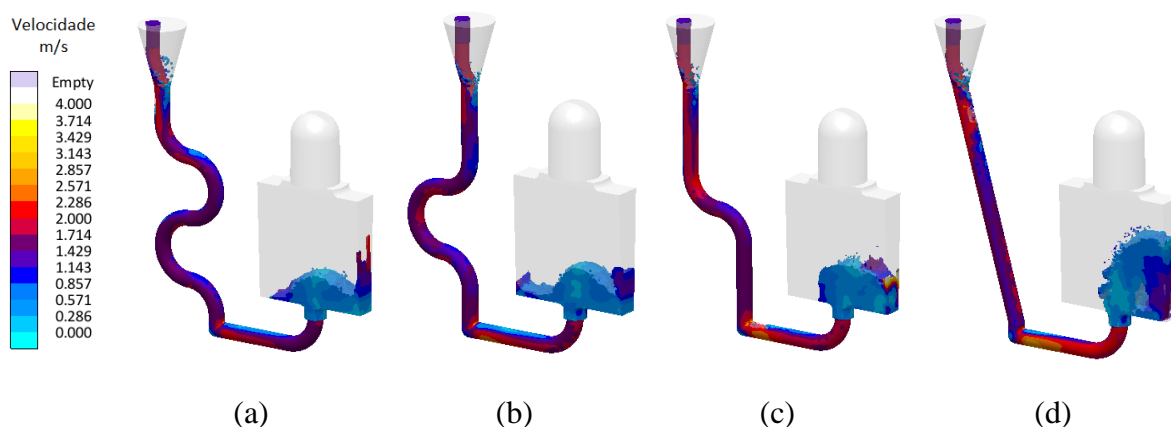


Figura 64 – Velocidade do MAGMASOFT® em 25% de enchimento para geração 05 (a) CP19, (b) CP20, (c) CP21 e (d) CP22

Após realização das gerações englobando referências e conceitos obtidos em gerações anteriores, o gráfico com a disposição de todos os resultados obtidos entre os corpos de prova 04 e 22 para as etapas 01 (um) e 02 (dois) do processo de simulação numérica do processo de fundição de metais foi realizado a fim da avaliação global dos resultados obtidos pela metodologia proposta.

3.10 DEFINIÇÃO DOS PROJETOS PARA ANÁLISE PRÁTICA DE FUNDIÇÃO

Inicialmente os resultados obtidos para etapa 01 (um) das simulações foram disponibilizados em um único gráfico em ordem crescente da numeração dos corpos de prova, a fim de serem avaliados e correlacionados, além dos resultados já demonstrado anteriormente foi adicionado o somatório de superfície de metal exposta ao ar (VOF – Total [-]), que é o somatório entre VOF – Canais [-] e VOF – Peça [-]. Linhas de tendência foram geradas a fim de melhor compreender os resultados obtidos pela metodologia proposta.

Da mesma forma todos os resultados obtidos para etapa 02 (dois) de simulações foram disponibilizados em um único gráfico em ordem crescente da numeração dos corpos de

prova, a fim de serem avaliados e correlacionados. Da mesma forma linhas de tendência foram geradas a fim de melhor compreender os resultados obtidos pela metodologia proposta.

Após plotagem dos gráficos com os resultados obtidos para todos os corpos de prova analisados entre a etapa 01 (um) e a etapa 02 (dois) os resultados foram disponibilizados em uma tabela em ordem crescente do resultado somatório da superfície de metal exposta ao ar (VOF – Total), para obtenção dos resultados extremos e espaçados, que definiram os conceitos a serem avaliados e correlacionados por prática de fundição.

Os conceitos selecionados para prática de fundição foram plotados em dois gráficos distintos, sendo o primeiro deles para etapa 01 (um) e o segundo para etapa 02 (dois), em ordem crescente do resultado VOF – Total [-] para correlação entre os mesmos e passíveis de comparação posterior aos resultados obtidos pela prática de fundição.

Os resultados práticos de fundição e os ensaios previamente determinados foram avaliados a fim de refinar e definir quais destes possuem maiores influências nas propriedades do componente final. Com a definição dos projetos para prática de fundição foi demonstrado na seção seguinte o processo de fabricação e fundição para os corpos de prova CP14, CP12, CP21 e CP08.

3.11 FERRAMENTAL DE FUNDIÇÃO

O ferramental de fundição foi fabricado em madeira, conforme dimensionamento do projeto do corpo de prova da Figura 54 com aplicação de 2% (dois) de sobre dimensionamento para compensar contração geométrica oriunda do processo de fundição para aços. A Figura 65 demonstra o ferramental fabricado e seus sobressalentes, projetados a fim de atender a prática do processo de moldagem, com ataque por baixo (tipo cachimbo), lateral inferior e pela lateral superior.

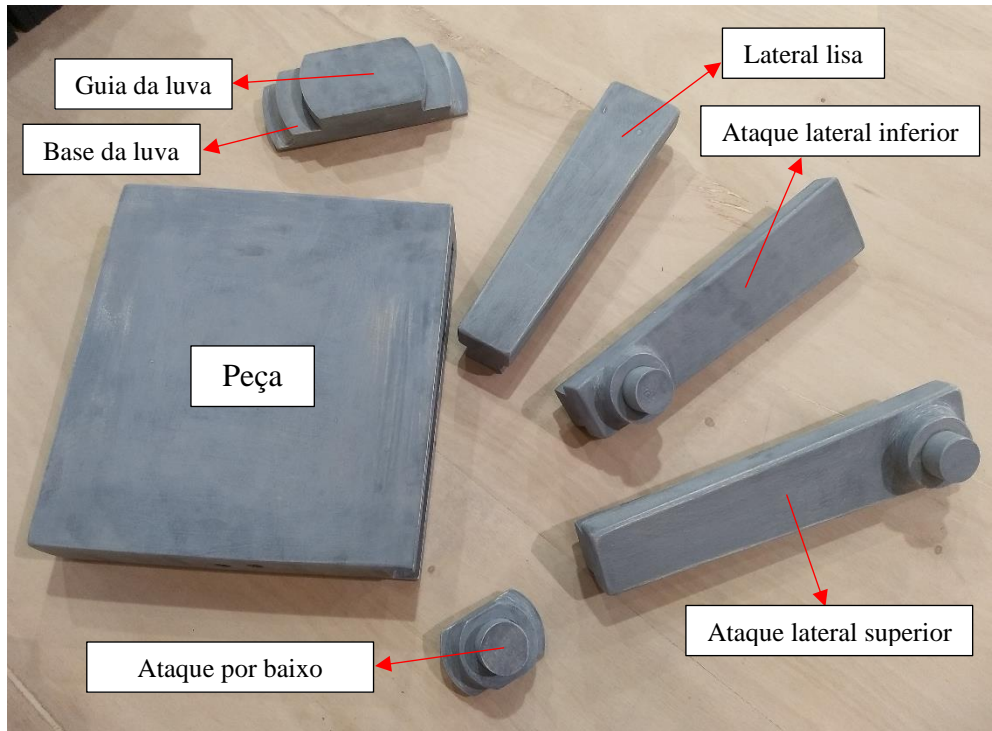


Figura 65 - Ferramental de fundição

Após fabricação do ferramental de fundição iniciou-se as etapas da prática de fundição.

3.12 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

A prática de fundição contemplou as seguintes etapas até a liberação do corpo de prova para análise:

- A. Moldagem;
- B. Pintura;
- C. Fechamento;
- D. Aciaria;
- E. Jateamento;
- F. Tratamento térmico:
 - a. Normalização;
 - b. Têmpera;
 - c. Revenimento;

Após realização de tais processos iniciou-se a preparação dos corpos de prova para avaliações previamente definidas deste estudo. Os capítulos seguintes demonstraram as etapas citadas acima, iniciado pelo processo de moldagem.

3.12.1 Moldagem

As peças foram moldadas pelo processo cura-a-frio (PEP-SET) em areia mista (80% recuperada e 20% nova) a base de sílica. A Figura 66a demonstra a etapa de moldagem da parte do fundo, com a montagem das manilhas refratárias antes do processo de enchimento do molde em areia, para o CP14, a parte do fundo é moldada invertida (de cabeça para baixo) após o preenchimento e espera do tempo de cura inicial o molde foi rotacionado à 180 ° e a parte da tampa é moldada conforme visualizado na Figura 66b.



Figura 66 – Processo de moldagem do corpo de prova 14 – CP14 (a) lado do fundo (invertido) e (b) lado da tampa

Os demais corpos de prova selecionados para a prática de fundição (CP12, CP21 e CP08) foram moldados nos mesmos parâmetros detalhados na Figura 66 para o CP14. A Figura 67a demonstra a moldagem da parte do fundo para o CP12, a Figura 67b demonstra a moldagem da parte do fundo para o CP21 e a Figura 67c a moldagem da parte do fundo para o CP08. A parte da tampa contemplou a manilha refrataria reta e o funil de vazamento, conforme demonstrado na Figura 66b para o CP14.

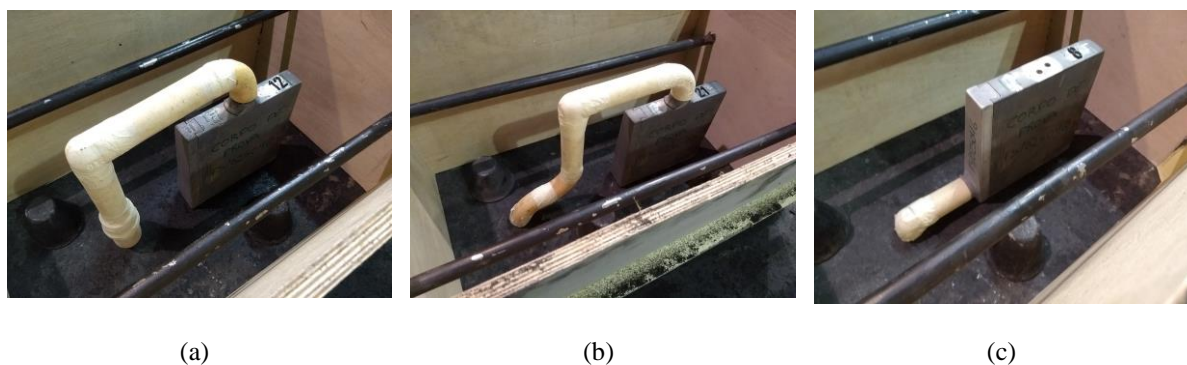


Figura 67 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova (a) corpo de prova 12 – CP12, (b) corpo de prova 21 – CP21 e (c) corpo de prova 08 – CP08

Após processo de moldagem os moldes ficaram em processo de cura por 12:00 horas até a liberação da etapa subsequente de pintura.

3.12.2 Pintura

Os moldes foram pintados com tinta à base de zirconita a álcool, por aspersão, em duas demãos intercaladas com o processo de queima. Após o processo de pintura os moldes foram fechados conforme procedimento descrito abaixo.

3.12.3 Fechamento

Após o processo de pintura os moldes foram fechados, grampeados e pesos acima dos mesmos foram adicionados, conforme prática comum do processo a fim de evitar abertura dos mesmos na linha de divisão entre fundo e tampa, decorrente da pressão metalostática exercida pelo metal líquido dentro da cavidade do molde.

Após realização destes procedimentos os moldes foram liberados para setor de aciaria, ao qual fica responsável pelo processo de fusão e vazamento do material conforme previamente especificado.

3.12.4 Aciaria

As peças foram fundidas 16:00 (dezesseis) horas após o processo de moldagem, tempo este suficiente para a cura do molde conforme procedimento interno da empresa. A

sequência de fusão dos corpos de prova ocorreu do CP14 passando pelo CP12, CP21 e CP08 (sequência do melhor para pior resultado da simulação).

A desoxidação foi realizada no forno e na panela de vazamento, com adição de CaSi (Cálcio Silício) e Al (Alumínio) em percentuais definidos pelo procedimento interno da empresa. A temperatura de fusão inicial foi controlada em 1585°C. O tempo de enchimento médio dos corpos de prova foi 10 (dez) segundos.

O processo de desmoldagem ocorreu 20:00 horas após o processo de fusão. Após a desmoldagem as identificações foram conferidas e os corpos de prova disponibilizados para o processo de jateamento por óxido.

3.12.5 Jateamento

Os corpos de prova foram separados após o processo de jateamento. A Figura 68a demonstra o CP14, a Figura 68b o CP12, a Figura 68c o CP21 e a Figura 68d o CP08.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 68 – Corpos de prova após jateamento (a) CP14, (b) CP12, (c) CP21 e (d) CP08

Após jateamento os sistemas de canais dos corpos de prova foram retirados por corte parcial mais impactado na região de ataque do sistema de enchimento.

3.12.6 Tratamento térmico

O processo de tratamento térmico foi realizado em 3 (três) etapas, sendo elas:

- A. Normalização;
- B. Têmpera;
- C. Revenimento;

Os processos de tratamento térmico (normalização, têmpera e revenimento) foram realizados no mesmo forno (forno elétrico), forno este denominado pela empresa como Forno TT01.

3.12.6.1 Normalização

O processo de normalização ocorreu conforme norma DIN EN 10292 pelo procedimento QT1, previamente definido. Foi utilizado uma rampa de aquecimento de 70 °C

por hora até 625 °C, realizado encharque de 1:00 hora e novamente o aquecimento em rampa de 70 °C por hora até 900°C com encharque de 4:00 horas.

O resfriamento ocorreu em temperatura ambiente, deixando os corpos de prova disponibilizados na grelha, após a retirada do carro de tratamento térmico de dentro do forno. Aproveitando a temperatura das peças, no processo de resfriamento os massalotes de alimentação foram cortados à quente (temperatura de 300 °C).

3.12.6.2 Têmpera

Foi utilizado uma rampa de aquecimento de 70 °C por hora até 600°C, realizado um encharque de 1:00 hora e novamente o aquecimento em rampa de 70 °C por hora até 900°C com encharque de 4:00 horas.

Na abertura do forno de tratamento térmico a grelha com as peças devidamente espaçadas foi direcionada para o tanque de óleo, para realização do resfriamento forçado do processo de têmpera. As peças ficaram submersas em processo de resfriamento por 3:00 horas, garantindo que as mesmas fossem retiradas em temperatura ambiente do tanque.

3.12.6.3 Revenimento

Foi utilizado uma rampa de aquecimento de 75 °C por hora até 600 °C, e realizado encharque de 3:00 horas.

Após o revenimento foi realizado o ensaio de dureza nos corpos de prova, como após o último processo de tratamento os corpos de prova apresentaram dureza acima do especificado pela norma interna da empresa, os mesmos foram novamente revenidos utilizando uma rampa de aquecimento de 81,25 °C por hora até 650 °C, com encharque de 4:00 horas.

Após a validação da dureza, dentro do especificado em procedimento interno as peças foram liberadas para continuidade dos processos previamente estabelecido neste trabalho.

3.13 PROCESSO DE USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram usinados pelo processo de fresamento, com remoção de material de 1,5 mm por face, similar aos procedimentos realizados em estudos de Henschel, Dudczig, Kruger e Aneziris [49] e Majidi [14], disponibilizados no procedimento metodológico neste estudo.

3.14 ENSAIOS DE LÍQUIDO PENETRANTE

Após o processo de usinagem os corpos de prova selecionados para prática de fundição foram submetidos ao ensaio de líquido penetrante, de acordo com a procedimento ASTM E 165 – 2012 – *Standard Practice for Liquid Penetrant Inspection Method*, a avaliação dos resultados foi realizada de forma comparativa qualitativamente, quantitativamente e correlacionados aos valores obtidos pela simulação numérica.

A Figura 69 demonstra o processo inicial do procedimento realizado, que é a limpeza das faces, onde foi possível também observar a identificação dos corpos em alto relevo.

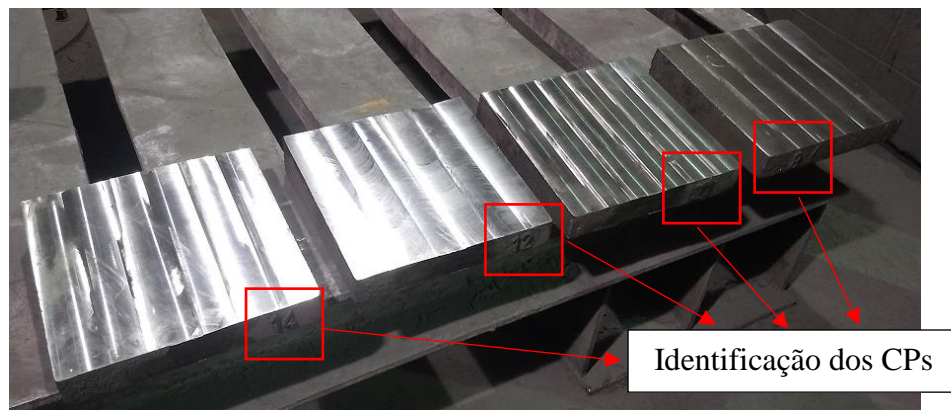


Figura 69 – Limpeza das faces e identificação dos corpos de prova para ensaio de líquido penetrante

A Figura 70 demonstra a continuidade do processo, com aplicação do líquido penetrante (de coloração avermelhada), tempo de aplicação de 15 (quinze) minutos que posteriormente foi removido por água em fluxo suave.

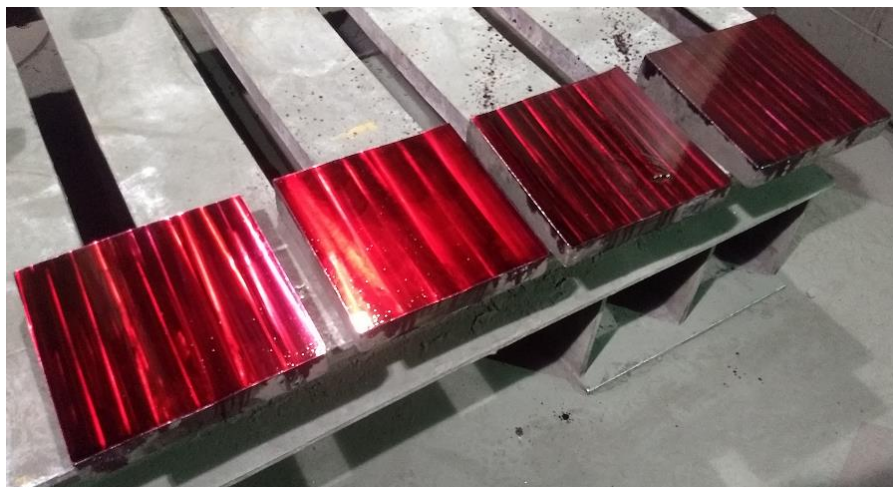


Figura 70 – Aplicação do penetrante no processo de ensaio

Após realização do ensaio de líquido penetrante as imagens das duas faces, para cada um dos corpos de prova foram geradas, as inclusões reveladas foram anotadas, quantificadas e comparadas visualmente com o resultado de inclusão por área [%].

Após realização da quantificação das indicações um gráfico foi plotado com a quantidade de indicações [uni.] de acordo com o corpo de prova selecionado para a prática de fundição, posteriormente esses resultados foram plotados em combinação com os resultados obtidos por simulação numérica (VOF – Total [-], aprisionamento de ar [%], velocidade [m/s], inclusão por área [%] e inclusão por volume [%]).

3.15 ENSAIOS DESTRUTIVOS

Os corpos de prova para ensaios mecânicos foram retirados dos corpos de prova definidos para prática de fundição (placas), após o processo de usinagem, conforme demonstrado na Figura 71, os mesmos foram inscritos dentro dos corpos de prova da prática de fundição para melhor visualização.

Da parte inferior para superior, 1 (um) corpo de prova para ensaio de tração ($\emptyset 12,5$), 1 (um) corpo de prova para ensaio de tração ($\emptyset 9,0$) e 4 (quatro) corpos de prova para ensaio de impacto (charpy).

Os corpos de prova retirados para ensaios mecânicos totalizam 4 (quatro) ensaios mecânicos de tração com corpo de prova $\emptyset 12,5$, da mesma forma 4 (quatro) corpos de prova para ensaios mecânicos de tração com $\emptyset 9,0$ e finalmente 12 (doze) corpos de prova para ensaio de impacto (charpy), totalizando 20 (vinte) ensaios mecânicos por corpo de prova fundido

As identificações dos corpos de prova foram realizadas da parte inferior para superior, conforme demonstrado na Figura 71, sendo as siglas “XX” o número do corpo de selecionado para prática de fundição (14, 12, 21 e 08), identificados sequencialmente. A identificação “T” refere-se aos corpos de prova para ensaio de tração, em ordem sequencial e a identificação “I” para os corpos de prova para ensaio de impacto (charpy), em ordem sequencial.

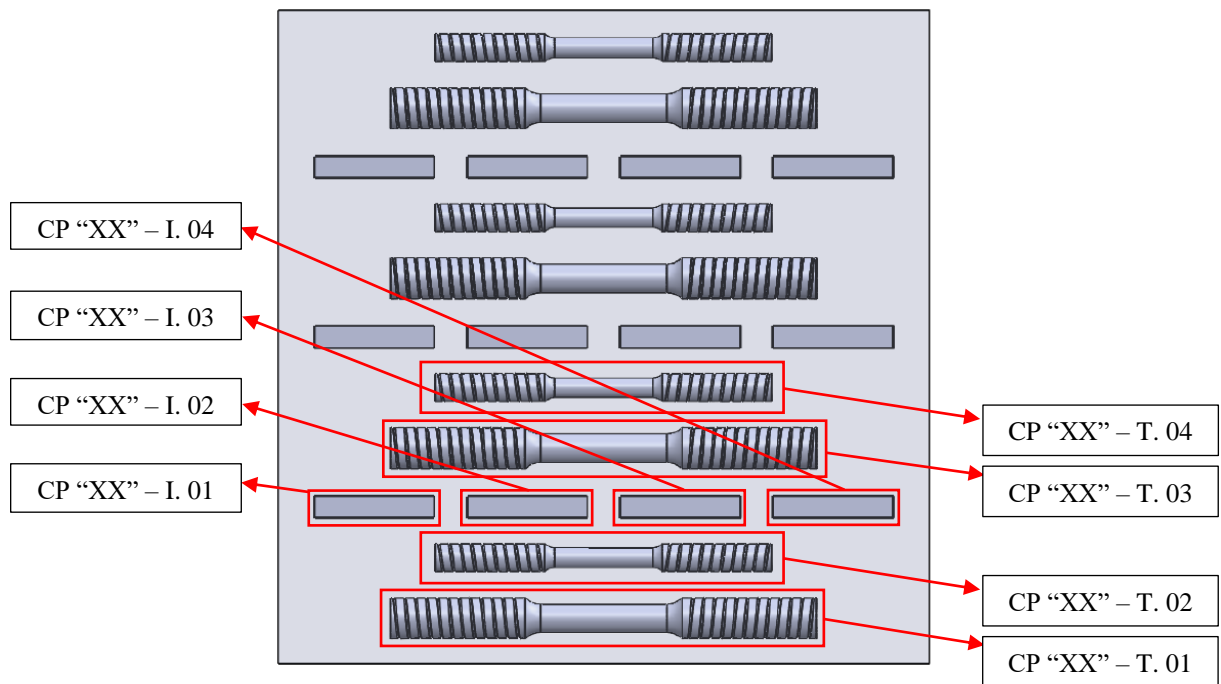


Figura 71 – Identificação dos corpos de prova para ensaio mecânico

Após metodologia definida para identificação dos corpos de prova foi realizado um detalhamento para traçagem e corte das placas, viabilizando o posterior beneficiamentos dos corpos de prova (usinagem) para as medidas finais, conforme respectivas normas.

3.16 CORTE DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO MECÂNICO

Os cortes iniciais dos corpos de prova foram realizados conforme detalhamento da Figura 72, a disposição dos mesmos foi realizada a fim de avaliar a maior área possível, com ensaios distintos e espaçados na placa.

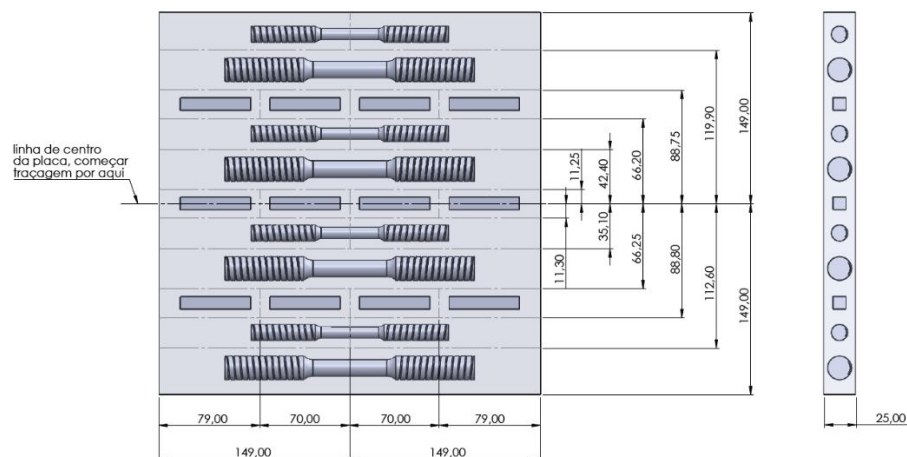


Figura 72 – Disposição dos corpos de prova nas placas fundidas

Após realização dos cortes as identificações foram conferidas e os mesmos liberados para realização do beneficiamento (usinagem), de acordo com cada respectivo corpo de prova estudado, sendo estes o processo de torneamento para os corpos de prova do ensaio mecânico de tração e fresamento e retifica respectivamente para os corpos de prova do ensaio mecânico de impacto (charpy).

3.17 ANÁLISE QUÍMICA

As análises químicas foram realizadas em amostras retiradas diretamente dos corpos de prova fundidos, por espectrometria de emissão ótica, em espectrômetro marca GNR Modelo Metallab 75-80J. Conforme metodologia definida pelo laboratório interno, no mínimo 03 (três) análises devem ser realizadas para definir a média entre as mesmas, considerada como composição final da liga fundida.

3.18 ENSAIO METALOGRÁFICO

A análise da metalografia foi realizada de forma comparativa, os corpos de prova foram submetidos a preparação metalográfica que são divididas em quatro etapas, corte da seção, lixamento, polimento e análise estrutural. A granulometria das lixas utilizadas foram as seguintes: 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 *Mesh*. Após o lixamento foi realizado o polimento, utilizando uma politriz com solução de 12% de alumina.

Para caracterização microestrutural utilizou-se um microscópio ótico Olympus BX51M onde se pode observar as inclusões na matriz metálica.

3.19 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os corpos de prova para realização dos ensaios mecânicos de tração foram confeccionados de acordo com a norma ASTM E8/E8M – *Standard Test for Tension Testing of Metallic Materials*. A Figura 73 demonstra o detalhamento do corpo de prova adaptado da norma mencionada.

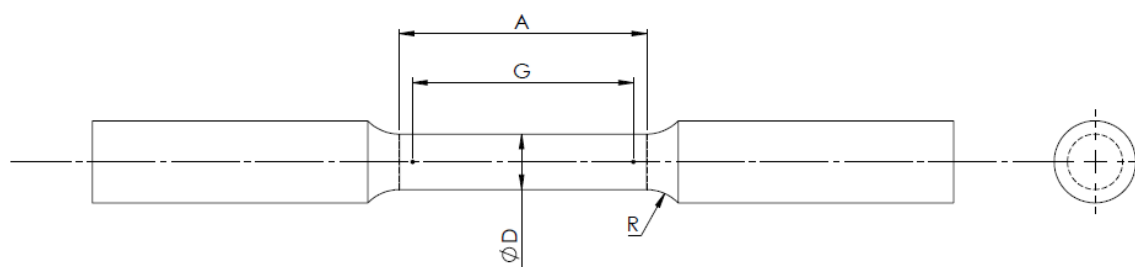


Figura 73 – Dimensionamento do corpo de prova para o ensaio mecânico de tração – Adptado da Norma ASTM E8/E8M

Os corpos de prova foram confeccionados em duas diferentes dimensões, padronizadas pela norma ASTM E8/E8M, sendo ambas “*standard specimen*” ou “amostra padrão”. As dimensões dos corpos de prova foram demonstradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensões para ensaio mecânico de tração norma E8 - Amostra padrão

	Amostra padrão			
	Amostra 01		Amostra 02	
	Medida	Tolerância	Medida	Tolerância
G - Comprimento útil (mínimo)	50,0	0,1	36,0	0,1
D - Diâmetro	12,5	0,2	9,0	0,1
R - Raio	10,0	-	8,0	-
A - Comprimento (mínimo)	56,0	-	45,0	-

A definição da realização dos ensaios de tração por duas diferentes configurações levou em consideração o referencial bibliográfico deste estudo que consta conforme Henschel, Dudczig, Kruger e Aneziris [49] que quanto maior o volume de aglomeração de inclusões maior a tendência a fragilização. Wunnenberg [17] cita que uma única inclusão pode levar a um defeito catastrófico. E que de modo geral, para aços de alta resistência as inclusões competem com a matriz como iniciadores de trinca [35]. Desta forma inclusões em menores seções podem possuir maior influência vindo de encontro com a proposta deste estudo, que é avaliar a influência destas no desempenho mecânico do componente fundido.

Para realização do ensaio de tração foi utilizado o equipamento Máquina Universal de Ensaio EMIC100 kN, Modelo DL30000 e metodologia descrita pela norma ASTM A E8/E8M-15a.

3.20 ENSAIO DE IMPACTO (CHARPY)

Os corpos de prova para realização do ensaio mecânico de impacto foram confeccionados de acordo com a norma ASTM E23 – 07a^{e1} – *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*¹ com entalhe em V (Tipo A). A Figura 74 demonstra o detalhamento do corpo de prova adaptado da norma mencionada para confecção do mesmo.

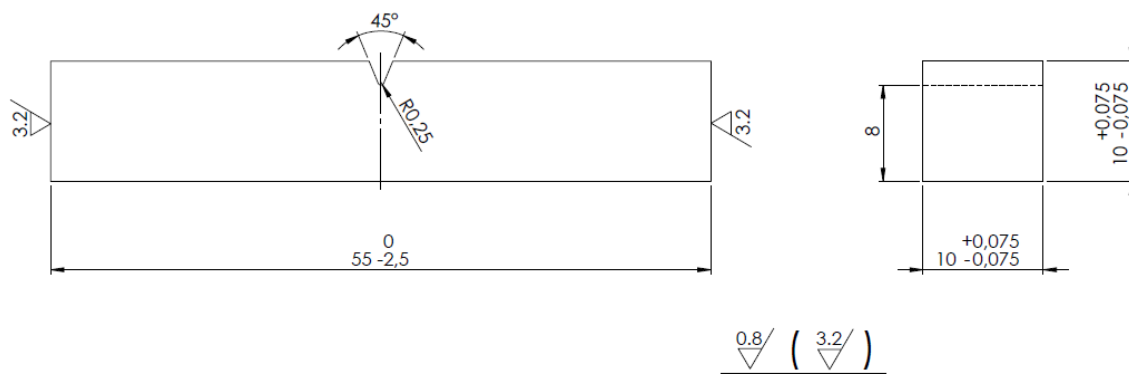


Figura 74 - Dimensionamento do corpo de prova para o ensaio mecânico de impacto (charpy) – adaptado da norma ASTM E23

Os corpos de prova foram usinados inicialmente em centro de usinagem até se aproximarem as medidas estipuladas por norma e posteriormente foram retificados em retificação plana.

Para realização do ensaio de impacto (charpy) foi utilizado o equipamento Pêndulo de Impacto de Charpy, Modelo PC-300 e metodologia descrita pela norma ASTM E23-16b, em temperatura ambiente (21°C).

3.21 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A análise por microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi realizada utilizando o equipamento da fabricante Carl Zeiss, modelo MA10 série EVO com EDS Quantax Bruker, os ensaios foram realizados na fratura de 02 (duas) peças submetidas ao ensaio de impacto (charpy) para resultados extremos, sendo eles os corpos de prova CP14 e CP08. Nos pontos analisados foi realizado um mapeamento do oxigênio buscando verificar concentração do mesmo em pontos específicos (inclusões).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE

A Figura 75 demonstra o resultado de aprisionamento de ar [%] para simulação comparativa de validação, reproduzindo a simulação de “Comparativo de Ponto de Ataque - Pressurizado” do estudo de Majidi [14]. A Figura 75a demonstra o resultado para o CP01, a Figura 75b para o CP02 e a Figura 75c para o CP03.

O resultado de aprisionamento de ar [%] é demonstrado após a realização completa do processo de enchimento na escala de 0 (zero) à 5 (cinco) [%]. A vista em corte proporciona a avaliação das áreas com maior tendência ao aparecimento de bolhas no componente fundido.

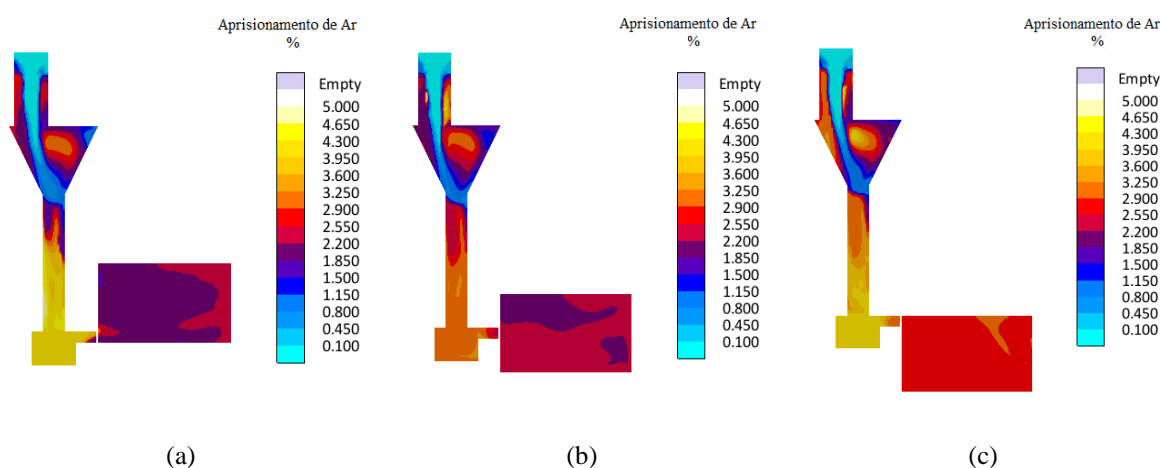
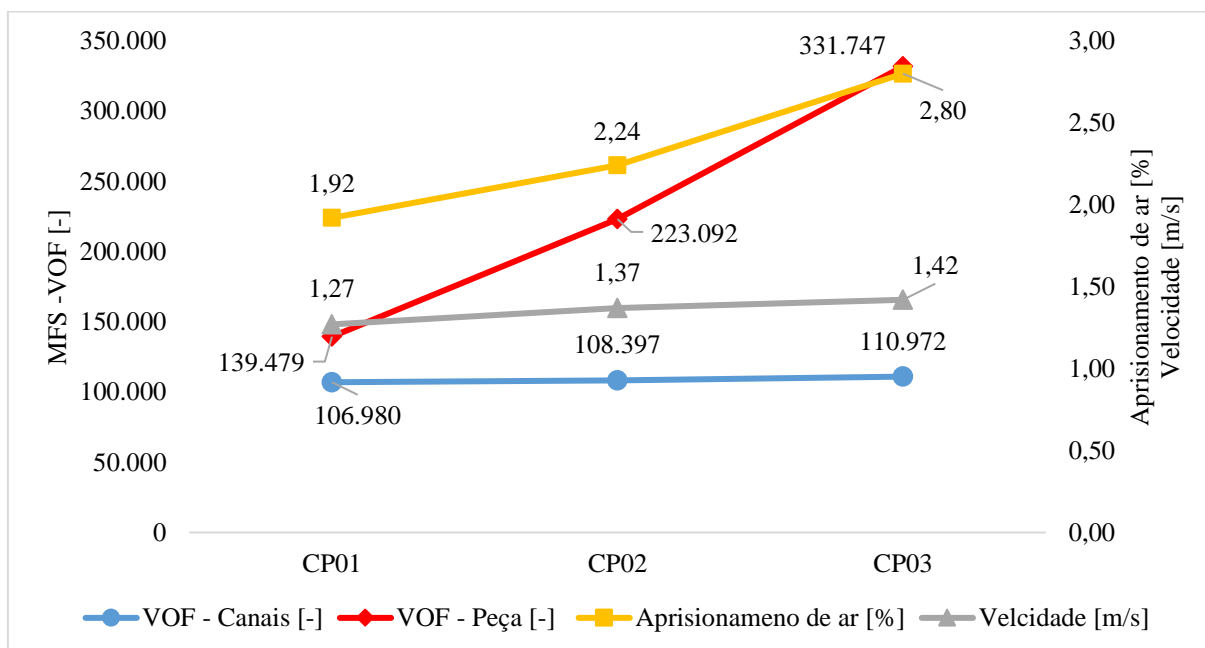


Figura 75 – Aprisionamento de ar do MAGMASOFT® (a) ataque lateral inferior, CP01, (b) ataque lateral intermediário, CP02 e (c) ataque lateral superior, CP03

Analisando os resultados obtidos para o aprisionamento de ar [%] da Figura 75 foi possível observar que o mesmo possui tendência crescente do CP01 para o CP03. Essa tendência crescente pode ser atribuída ao posicionamento do canal de ataque na peça, o efeito cachoeira visualizado no CP02 e agravado no CP03 eleva a turbulência do metal líquido gerando bolhas e retendo ar no meio líquido.

O Gráfico 1 demonstra os resultados obtidos via MAGMASOFT® para reprodução do estudo realizado por Majidi [14] que foram analisados comparativamente com o gráfico da Figura 29d, levados em consideração apenas os resultados de VOF – Canais [-] e VOF – Peça [-], já que em estudos de Majidi [14] não levaram em consideração o resultado médio de aprisionamento de ar [%] e velocidade [m/s].

Gráfico 1 – Análise gráfica – Etapa 01 - Estudo comparativo entre metodologias



Analisando o Gráfico 1 foi observado uma redução percentual de 44% e 25% respectivamente para os corpos de prova CP01 e CP02 em comparação ao CP03 para o resultado somatório da superfície de metal exposta ao ar [-].

Para o resultado de aprisionamento de ar [%] foi observado uma redução percentual de 31% e 20% respectivamente para os corpos de prova CP01 e CP02 em comparação ao CP03.

Para o resultado de velocidade [m/s] foi observado uma redução percentual de 11% e 4% respectivamente para os corpos de prova CP01 e CP02 em comparação ao CP03.

Foi possível observar que o resultado de superfície de metal exposta ao ar para VOF – Canais [-] não mostrou diferença significativa, já que estes possuem mesmo dimensionamento e a alteração do posicionamento foi realizada pelo deslocamento da peça em função do canal. Após a passagem do metal líquido pelo canal foi observado resultado crescente para VOF – Peça [-] e aprisionamento de ar [%], devido ao efeito cachoeira a turbulência foi elevada assim como admissão de ar no meio líquido.

A metodologia aplicada para validação levando em consideração o resultado de superfície de metal exposta ao ar [-] e aprisionamento de ar [%] do MAGMASOFT® reproduzindo a simulação de “Comparativo de Ponto de Ataque - Pressurizado” do estudo de Majidi [14], se mostrou eficiente para avaliação de reoxidação em componentes fundidos por gravidade.

Os resultados obtidos para superfície de metal exposta ao ar [-] e aprisionamento de ar [%] para os corpos de prova CP01, CP02 e CP03 foram condizentes com o esperado em prática de fundição, onde o efeito cachoeira promovido pelo deslocamento da peça em função

do ponto de ataque deve promover maior turbulência e elevar a admissão de ar no meio líquido, elevando assim os valores obtidos para superfície de metal exposta ao ar e aprisionamento de ar.

O resultado de velocidade [m/s] também se mostrou crescente do CP01 para o CP03, isso ocorreu devido a pressurização do sistema, com o ataque inferior o metal já dentro da cavidade do molde impõe uma restrição ao fluxo oriundo do canal, reduzindo a velocidade média do metal líquido, o que demora a ocorrer para o CP02 e acontece somente no final do processo para o CP03.

4.2 CORPO DE PROVA

O corpo de prova projetado atendeu as expectativas para análise de incorporação de ar em sistemas de vazamento, tendo uma altura de queda do sistema de enchimento considerável (superior a 600 mm) para a este tipo de análise e promovendo uma posterior facilidade para remoção dos corpos de prova para ensaios mecânicos.

As vistas em corte da Figura 76a (frontal) e Figura 76b (lateral) demonstram o resultado de módulo térmico [cm] contemplando peça e massalote de alimentação.

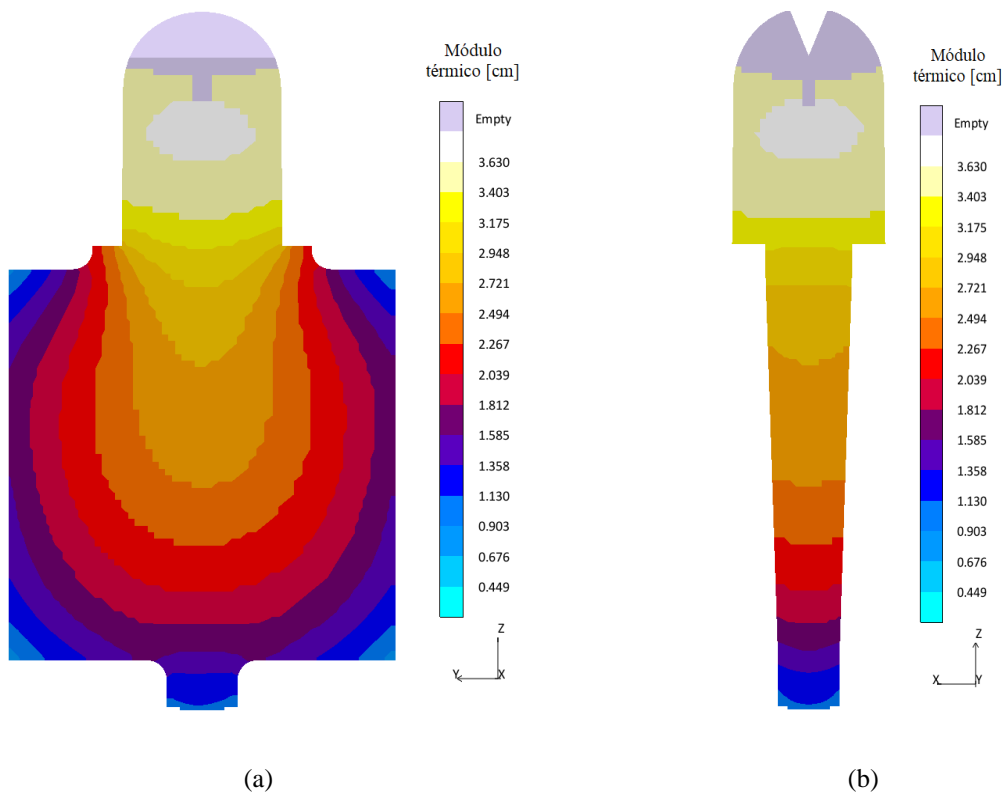


Figura 76 - Módulo térmico (a) vista frontal em corte e (b) vista lateral em corte

O maior módulo térmico [cm] foi encontrado dentro do massalote, o que representa o correto dimensionamento do sistema de alimentação, dando a entender que o último metal líquido do sistema deve-se encontrar dentro do mesmo.

A vista em seção da Figura 77 demonstra o resultado de porosidade [%], pontos de avaliação espaçados foram adicionados para avaliação pontual do resultado entre diferentes regiões. A Figura 77a demonstra a vista frontal em corte e a Figura 77b a vista lateral em corte.

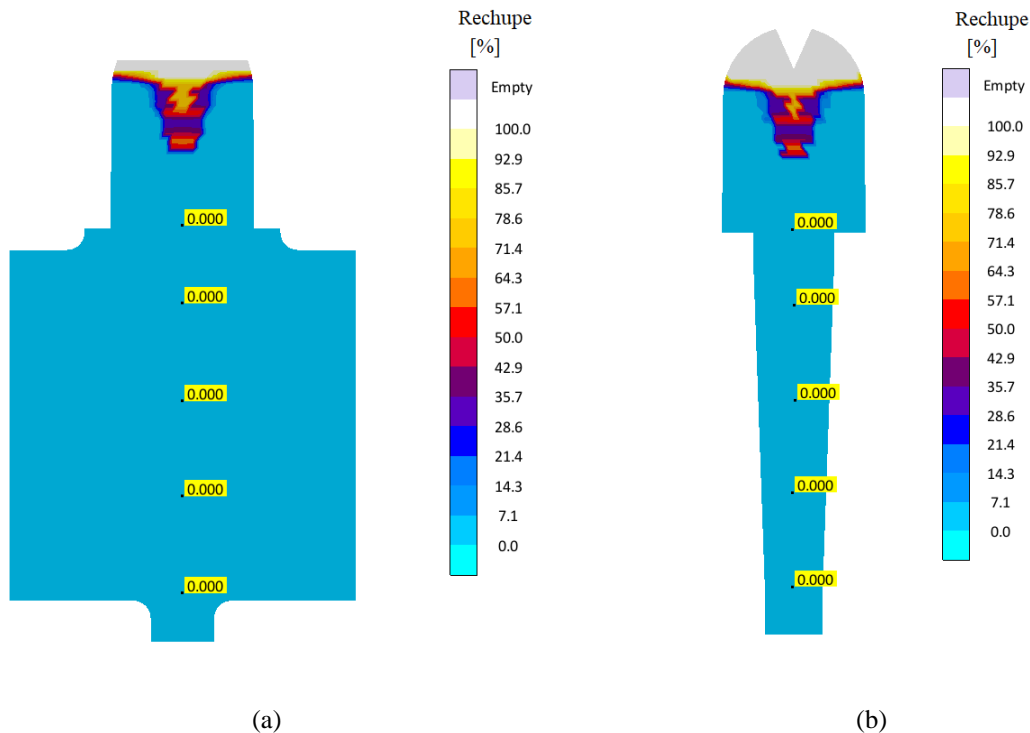


Figura 77 - Porosidade (a) vista frontal em corte e (b) vista lateral em corte

O resultado de rechupe [%], constatou que o projeto está dimensionado de forma correta a não promover este tipo de defeito, conforme Hardin e Beckermann [51] com teores acima de 0,1% possuem impacto na ductilidade final do produto, sendo 0,04% o limitante para alongamentos iguais ou superiores a 10% para aços de alta resistência.

Da mesma forma uma análise da microporosidade [%] conforme demonstrado na Figura 78 foi realizada, pontos espaçados foram adicionados para avaliação pontual do resultado entre diferentes regiões. A Figura 78a demonstra a vista frontal em corte e a Figura 78b a vista lateral em corte.

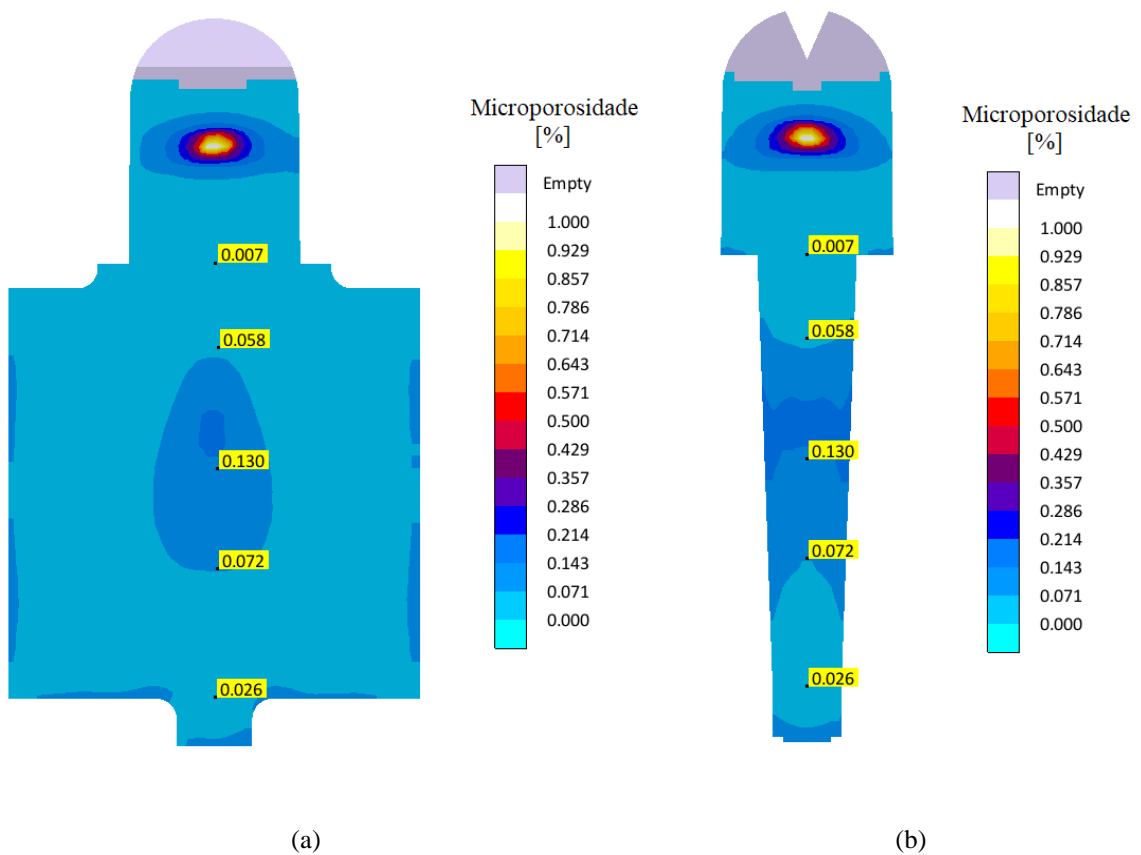


Figura 78 - Microporosidade (a) vista frontal em corte e (b) vista lateral em corte

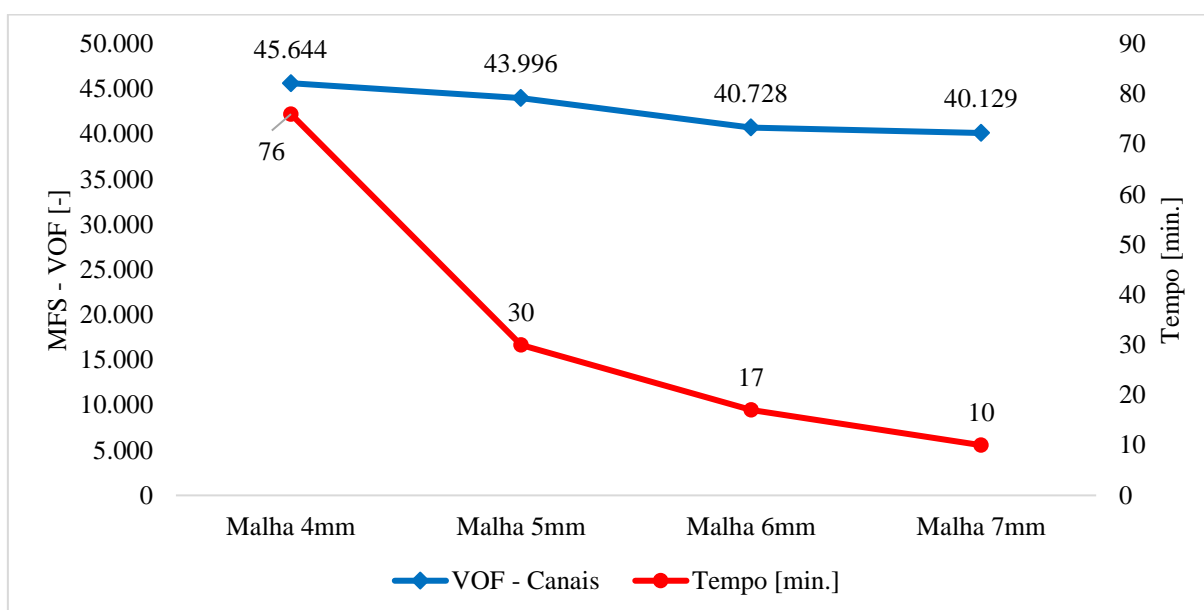
O resultado de microporosidade [%] apresentado na Figura 78 demonstra a sanidade do material, os resultados encontraram-se abaixo de teores de 0,15%.

Para finalizar os requisitos estipulados por Hartmann [41] para o dimensionamento de corpos de prova foi visualizado o posicionamento do massalote na parte superior da área de avaliação (peça), sem ligação ao sistema de enchimento, para que não venha a influenciar as análises dos sistemas de enchimento que serão abordados neste estudo.

4.3 DEPENDÊNCIA DE MALHA

O Gráfico 2 demonstra o resultado de superfície livre do metal exposta ao ar para VOF – Canais [-], de acordo com o tamanho da malha utilizada no processo SNPFM assim como o tempo necessário para realização da simulação de acordo com a mesma aplicada.

Gráfico 2 - Dependência de malha - Resultado de VOF - Canais x Tempo de Simulação



O refinamento da malha elevou os valores obtidos para superfície livre de metal exposta ao ar (VOF), visto que aumenta o número de células a serem avaliadas na simulação, com o refinamento da malha o tempo de simulação também foi elevado.

Para continuidade das simulações a malha definida foi de 5mm de aresta, levando em consideração um resultado médio obtido entre os valores de VOF – Canais [-] e um tempo de simulação praticável por corpo de prova.

4.4 ANÁLISE DE SNPFM

A Figura 79 demonstra o resultado de aprisionamento de ar [%] do MAGMASOFT® para simulação numérica do processo de fundição da geração 01. A Figura 79a demonstra o resultado para o corpo de prova 04 - CP04, a Figura 79b para o corpo de prova 05 - CP05, a Figura 79c para o corpo de prova 06 - CP06 e a Figura 79d para o corpo de prova 07 - CP07.

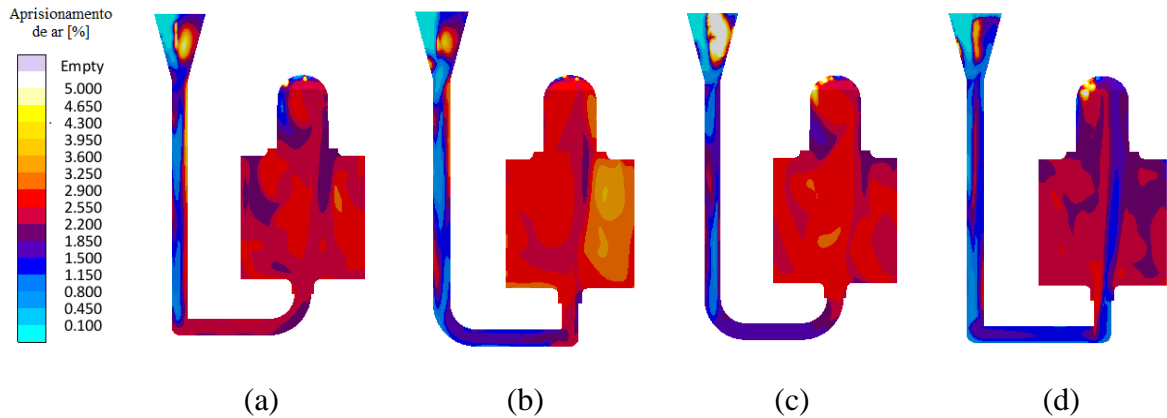
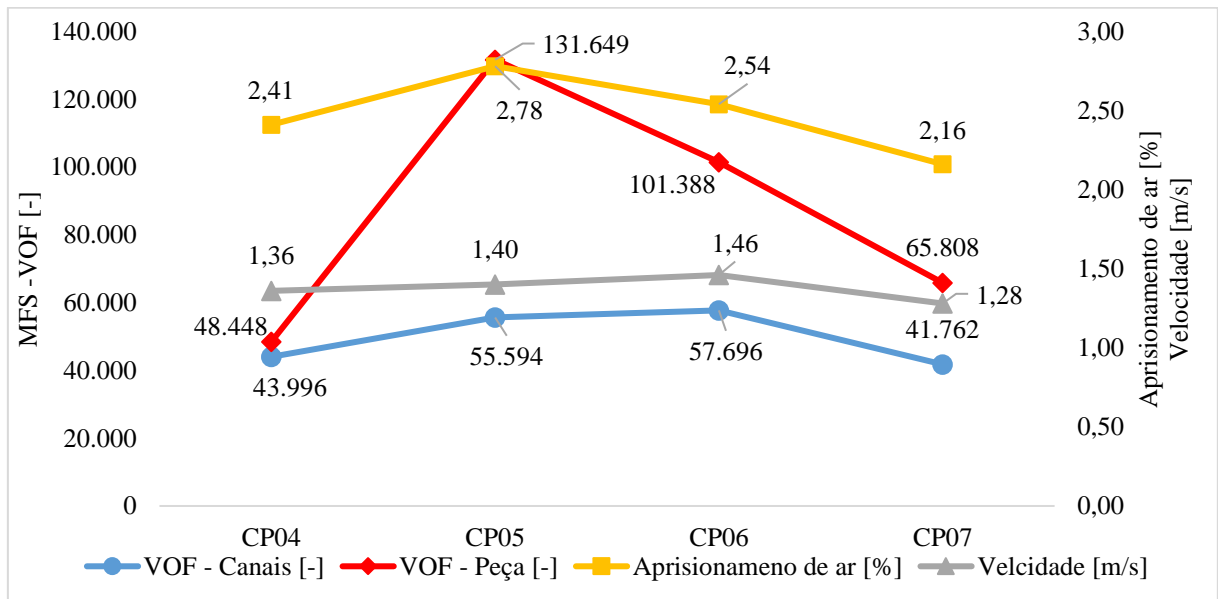


Figura 79 - Aprisionamento de ar do MAGMASOFT® (a) CP04, (b) CP05, (c) CP06 e (d) CP07

Analisando os resultados obtidos para o aprisionamento de ar [%] da Figura 79 foi possível observar que para os CP05 e CP07, diferente dos demais, possuem linhas de fluxo visualizadas do canal de ataque com ligação direta ao massalote de alimentação, essas linhas de fluxo podem ser atribuídas a mudança brusca realizada pelo cotovelo logo abaixo do canal de ataque, direcionando o metal líquido para o massalote de alimentação.

Os resultados obtidos para geração 01 do MAGMASOFT® foram demonstrados no Gráfico 3 para concluir a análise visual dos resultados de velocidade [m/s] e aprisionamento de ar [%].

Gráfico 3 - Análise gráfica – Etapa 01 - Resultados MAGMASOFT® – Geração 01



Analisando o Gráfico 3 para geração 01 foi observado uma redução percentual de 51%, 15% e 43% respectivamente para os corpos de prova CP04, CP06 e CP07 em comparação ao CP05 para o resultado somatório da superfície de metal exposta ao ar [-].

Para o aprisionamento de ar [%] foi observado uma redução percentual de 13%, 9% e 22% respectivamente para os corpos de prova CP04, CP06 e CP07 em comparação ao CP05.

Para o resultado de velocidade [m/s] foi observado uma redução percentual de 7%, 4% e 12% respectivamente para os corpos de prova CP04, CP05 e CP07 em comparação ao CP06.

A análise do Gráfico 3 demonstrou que apesar de todos os projetos estarem na configuração com ataque por baixo (também conhecido como ataque tipo cachimbo), existe uma discrepância considerável entre os resultados obtidos, dado a diferença encontrada ser superior a 50% para resultados extremos da somatória de superfície de metal exposta ao ar [-], comparando o CP04 e CP05.

O melhor resultado obtido para a primeira geração comparando os corpos de prova CP04, CP05, CP06 e CP07 foi para o CP04, a quebra de fluxo brusca ocasiona pela geometria do cotovelo na queda vertical do metal líquido fez com que o sistema de canais se preencha rapidamente (pressurização), principalmente para o canal de descida, evitando maiores superfícies de metal exposta ao ar, o formato subsequente (curva longa 90°) fez com que o metal entre com maior suavidade na cavidade do molde. A menor velocidade média no canal de ataque não foi a do CP04, isso significa que, não somente a velocidade do metal líquido deve ser levada em consideração, mas também o perfil de fluxo do metal líquido no preenchimento da cavidade do molde.

O CP05 com o formato de curva longa e cotovelo fez com que o metal líquido fosse acelerado na transferência de sentido do mesmo, de energia cinética vertical para horizontal, devido à falta de uma imposição de restrição de fluxo e despressurizando o canal de distribuição, o formato subsequente de cotovelo levou a um jato de metal líquido no sentido vertical (de baixo para cima) na entrada do metal líquido dentro cavidade do molde, ocasionado o chamado “efeito chafariz” dentro processo de fundição, levando a maiores resultados para VOF – Peça [-].

Para o CP06 composto por duas curvas longas não existiu nenhum tipo de restrição de fluxo, fazendo com que o canal trabalhe despressurizado, obtendo assim um maior valor para VOF – Canais [-] se comparado com sua geração, também a maior velocidade média de metal líquido no ataque, mas não proporcionando tamanha turbulência se comparada ao CP05 para o VOF – Peça [-], devido a alteração brusca logo abaixo do ponto de ataque.

Analisando o CP07 foi possível observar um melhor resultado de VOF – Canais, já que o formato de cotovelo nas duas geometrias fez com que o sistema de canais se preenche-se mais rapidamente (pressurização) se comparada ao CP04, mesmo que com significância relativamente pequena para os canais, a alteração dessa segunda geometria elevou consideravelmente o resultado para o VOF – Peça [-], novamente devido ao “efeito chafariz” dentro da cavidade do molde. A pressurização do sistema levou a redução da velocidade [m/s] média do metal líquido na entrada da cavidade do molde se comparada com os demais *designs* estudados nessa geração.

De forma geral os melhores resultados obtidos para a geração 01 foram para os CP04 e CP07. Comparando os dois corpos de prova foi observado uma diferença percentual de 14% para o somatório de superfície de metal exposta ao ar [-] entre o CP04 (melhor resultado) e o CP 07 (pior resultado), enquanto que para o aprisionamento de ar [%] foi observado uma diferença de 12% e para velocidade [m/s] de 6%, com inversão de resultados o melhor e pior resultado, sendo o CP07 (melhor resultado) e o CP04 (pior resultado) para os dois últimos analisados.

A Figura 80 demonstra o resultado de diâmetro, localização e aglomeração de inclusões do MAGMAsteel® com 100% do enchimento realizado para geração 01. A Figura 80a demonstra o resultado para o CP04, a Figura 80b para o CP05, a Figura 80c para o CP06 e a Figura 80d para o CP07.

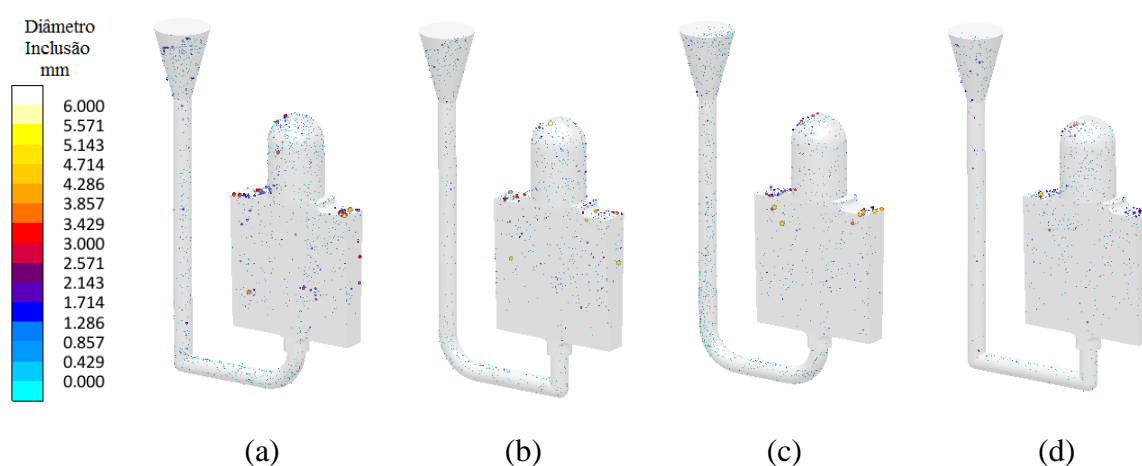


Figura 80 - Diâmetro, localização e aglomeração de inclusões de reoxidação do MAGMAsteel® (a) CP04, (b) CP05, (c) CP06 e (d) CP07

Analisando a Figura 80 foi observado que a baixa superfície de metal exposta ao ar para o CP04 e a turbulência excessiva avaliada pelo resultado de VOF – Peça [-] no CP07 fizeram com que os estes resultados se comparados apresentassem um número menor de

inclusões de reoxidação com maior diâmetro e um maior número de inclusões de menor diâmetro com maior aglomeração respectivamente.

A Figura 81 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o corpo de prova 04 - CP04. A Figura 81a demonstra a vista isométrica, a Figura 81b a vista frontal e a Figura 81c a vista traseira.

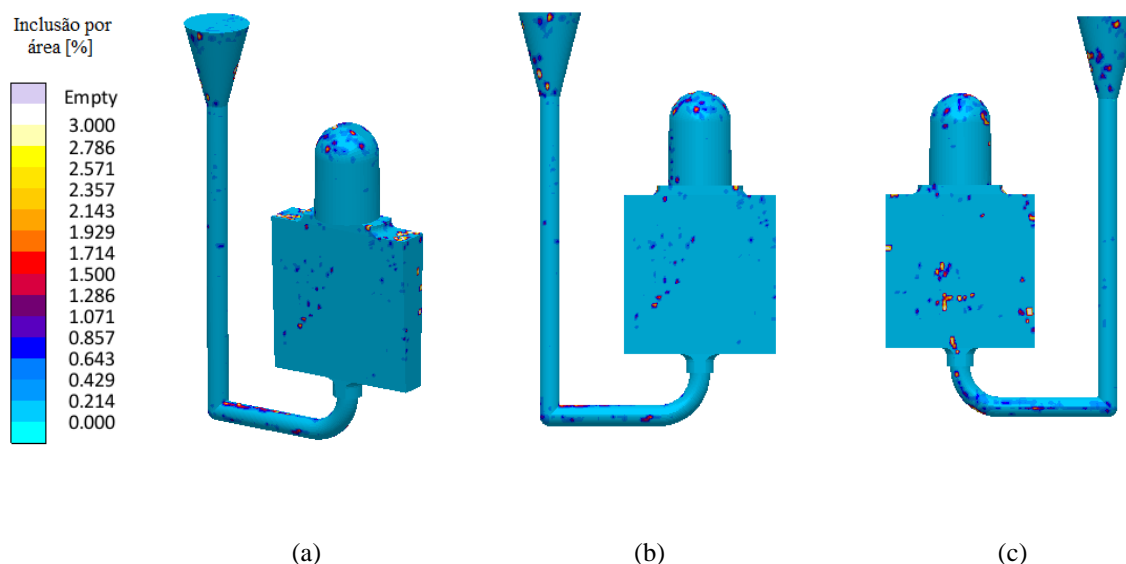


Figura 81 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP04 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 82 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o corpo de prova 05 - CP05. A Figura 82a demonstra a vista isométrica, a Figura 82b a vista frontal e a Figura 82c a vista traseira.

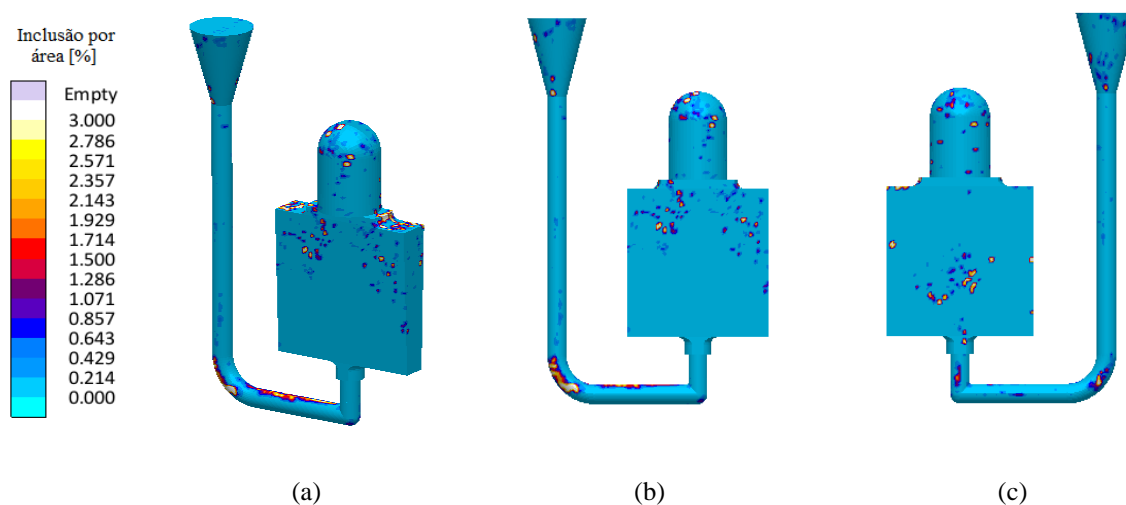


Figura 82 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP05 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 83 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o corpo de prova 06 - CP06. A Figura 83a demonstra a vista isométrica, a Figura 83b a vista frontal e a Figura 83c a vista traseira.

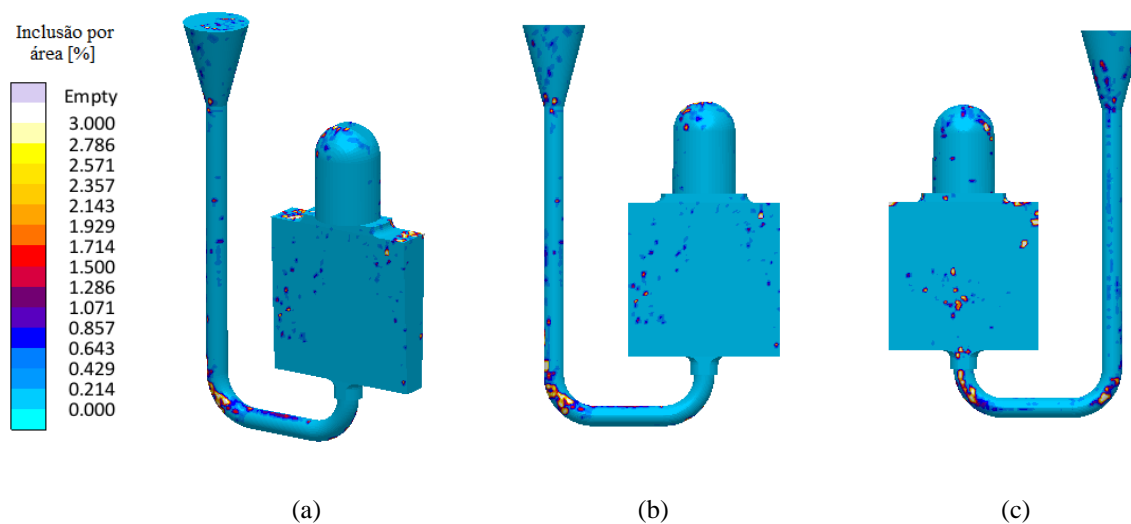


Figura 83 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP06 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 84 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o corpo de prova 07 - CP07. A Figura 84a demonstra a vista isométrica, a Figura 84b a vista frontal e a Figura 84c a vista traseira.

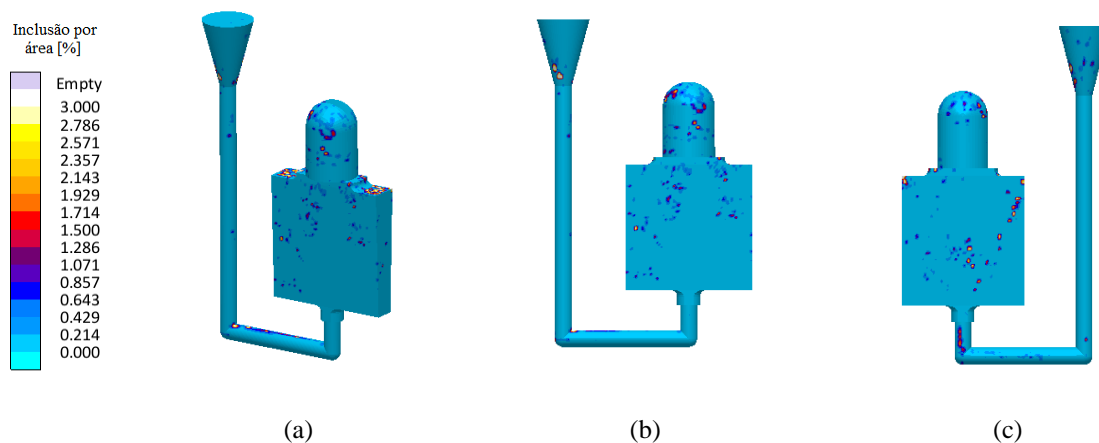


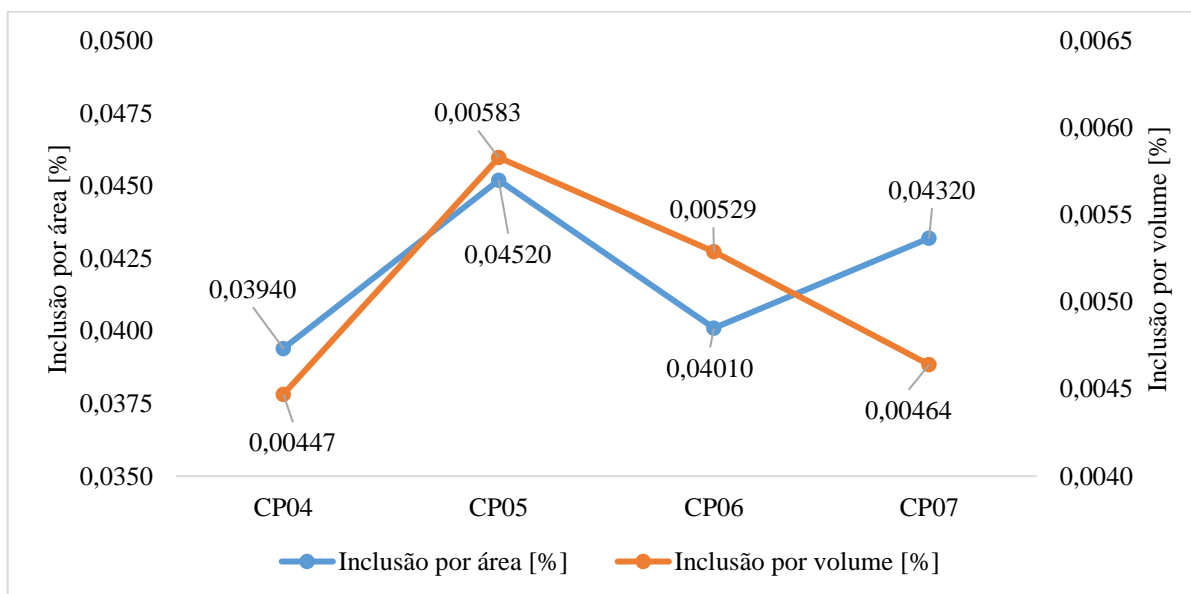
Figura 84 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP07 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

Analisando as imagens obtidas para geração 01 no resultado de inclusão por área [%] foi observado que a geometria do corpo de prova projetado deste estudo promoveu a possibilidade de que inclusões de reoxidação apareçam de forma distribuída nas faces laterais

do molde, possibilitando uma maior área de correlação posterior com a prática de fundição, visualmente foi observado que o projeto do sistema de enchimento empregado promoveu diferentes indicações em posicionamento e concentração.

O Gráfico 4 demonstra os resultados obtidos via MAGMAsteel® para geração 01, contemplando os valores específicos para inclusão por área [%] e inclusão por volume [%].

Gráfico 4 – Análise gráfica – Etapa 02 - Resultados MAGMAsteel® – Geração 01



Analisando o Gráfico 4 foi observado uma redução percentual de 13%, 11% e 4% respectivamente para os corpos de prova CP04, CP06 e CP07 em comparação ao CP05 para o resultado de inclusão por área [%].

Para o resultado de inclusão por volume [%] foi observado uma redução percentual de 23%, 9% e 20% respectivamente para os corpos de prova CP04, CP06 e CP07 em comparação ao CP05.

Os melhores resultados obtidos para inclusão por área [%] e inclusão por volume [%] foram para o CP04, tal gráfico apresentou características semelhantes ao Gráfico 3 com um ponto discrepante para inclusão por área para o CP07, tais resultados reafirmaram o melhor *design* selecionado para o andamento das gerações subsequentes.

A Figura 85 demonstra o resultado de aprisionamento de ar para simulação numérica do processo de fundição para a geração 02. A Figura 85a demonstra o resultado para o CP04, a Figura 85b para o CP08, a Figura 85c para o CP09 e a Figura 85d para o CP10.

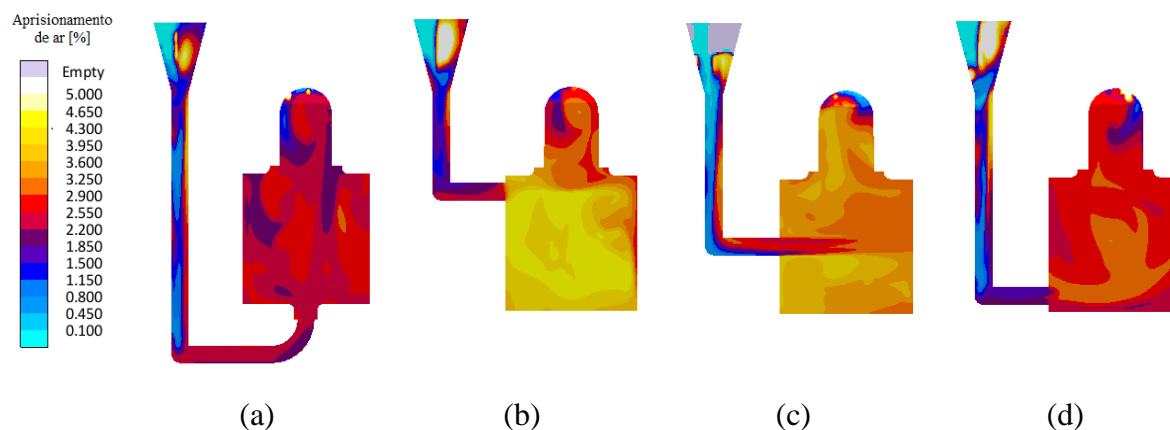
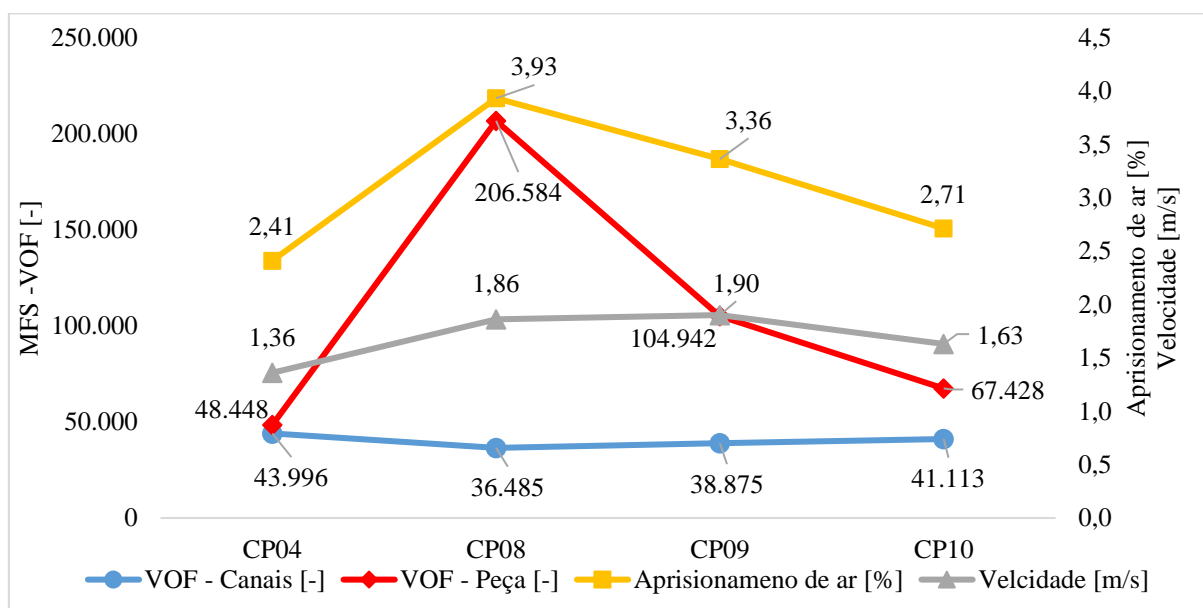


Figura 85 - Aprisionamento de ar do MAGMASOFT® (a) CP04, (b) CP08, (c) CP09 e (d) CP10

Analisando os resultados obtidos para o aprisionamento de ar [%] da Figura 85 foi visualizado que o efeito cachoeira é prejudicial, visto que, para maiores alturas de queda do metal líquido dentro da cavidade do molde (CP08) foi observado áreas com maior aprisionamento de ar percentual. O melhor resultado obtido para essa geração foi para o CP04, em que o ataque tipo cachimbo com correto dimensionamento reduziu a média percentual de aprisionamento de ar para a peça.

Os resultados obtidos para geração 02 do MAGMASOFT® são demonstrados no Gráfico 5 para concluir a análise visual do resultado de aprisionamento de ar [%] e velocidade [m/s].

Gráfico 5 - Análise gráfica – Etapa 01 - Resultados MAGMASOFT® – Geração 02



Analisando o Gráfico 5 foi observado uma redução percentual de 62%, 41% e 55% respectivamente para os corpos de prova CP04, CP09 e CP10 em comparação ao CP08 para o resultado somatório da superfície de metal exposta ao ar [-].

Para o resultado de aprisionamento de ar [%] foi observado uma redução percentual de 39%, 15% e 31% respectivamente para os corpos de prova CP04, CP09 e CP10 em comparação com o CP08.

Para o resultado de velocidade [m/s] foi observado uma redução percentual de 28%, 2% e 14% respectivamente para os corpos de prova CP04, CP08 e CP10 em comparação ao CP09.

Foi observado que somente a velocidade [m/s] de entrada do metal líquido na cavidade do molde não possui influência sobre os demais resultados, maiores alturas de queda do metal líquido (efeito cachoeira) tendem a elevar o resultado de superfície de metal exposta ao ar [-] e aprisionamento de ar [%], sem variação considerável da velocidade [m/s] do metal líquido no ponto de ataque.

Para o CP08 que demonstrou a maior altura de queda do metal líquido dentro da cavidade do molde foi possível observar os piores resultados obtidos da geração 02, com a diminuição deste efeito no CP09 e a eliminação do efeito para o CP10 foi observado tendência de redução dos resultados obtidos. Foi possível observar também que o CP04 com ataque por baixo (tipo cachimbo) mostrou maior eficiência se comparado aos ataques laterais realizados, independentemente dos pontos de ataque.

Analisando o Gráfico 5 foi possível perceber que o conceito de Campbell [15] para pontos de ataque em fundição por gravidade é viável desde que ocorra um correto dimensionamento do mesmo, já que ampliando as comparações para diferentes sistemas de enchimento por baixo (tipo cachimbo) conforme (geração 01 - Gráfico 3) percebeu-se resultados piores aos obtidos para o CP09 e CP10.

A Figura 86 demonstra o resultado de diâmetro, localização e aglomeração de inclusões do MAGMAsteel® com 100% do enchimento realizado para geração 02. A Figura 86a demonstra o resultado para o CP04, a Figura 86b para o CP08, a Figura 86c para o CP09 e a Figura 86d para o CP10.

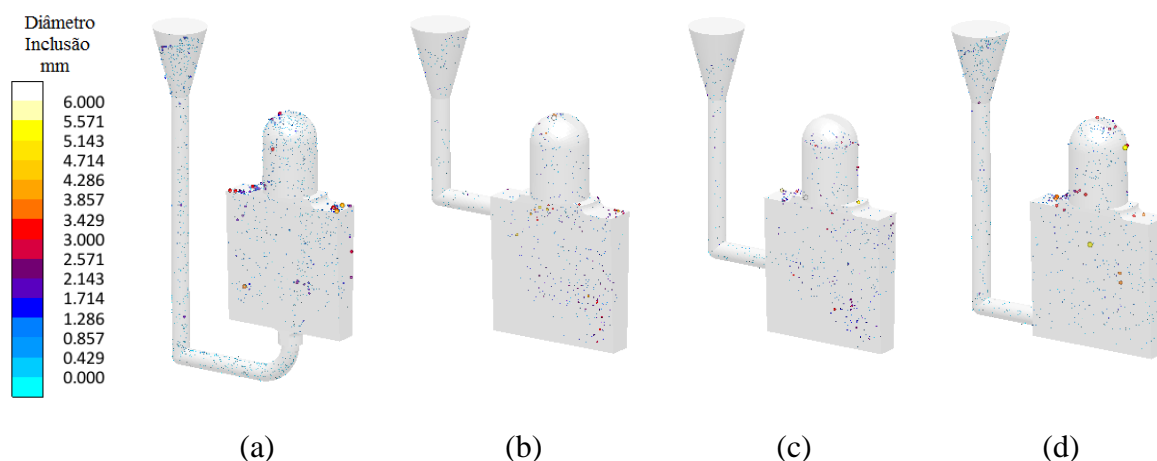


Figura 86 - Diâmetro, localização e aglomeração de inclusões de reoxidação do MAGMAsteel® (a) CP04, (b) CP08, (c) CP09 e (d) CP10

Analisando a Figura 86 foi observado que para os corpos de prova que não apresentam o efeito cachoeira (CP04 e CP10), possuem inclusões com maior diâmetro, principalmente visualizadas na face superior dos mesmos, oposto a esse comportamento os corpos de prova que apresentam o efeito cachoeira (CP08 e CP09), apresentam inclusões com menor diâmetro porém com maior aglomeração, visualizadas de forma distribuída no corpo de prova. Esse resultado vem de encontro com o conceito de Campbell [31] demonstrado no referencial bibliográfico deste estudo.

A Figura 87 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o corpo de prova 08 – CP08. A Figura 87a demonstra a vista isométrica, a Figura 87b a vista frontal e a Figura 87c a vista traseira.

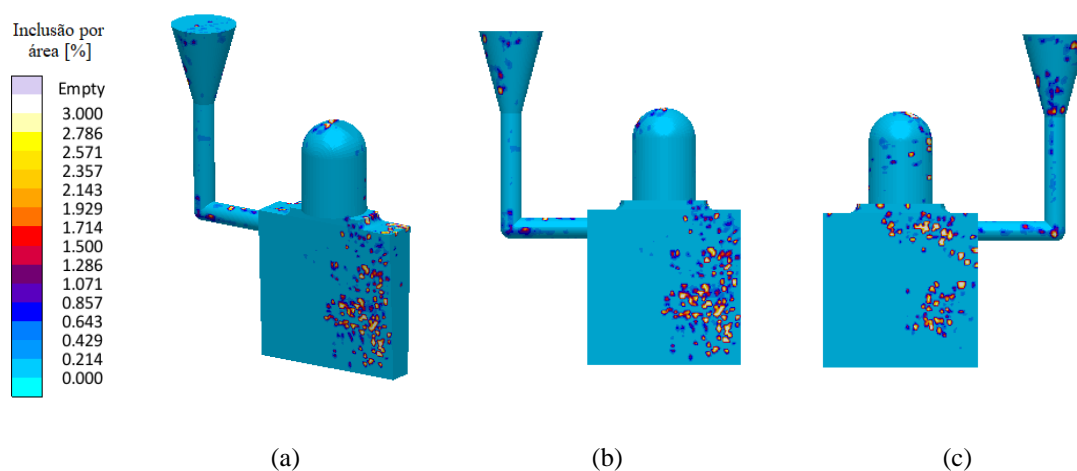


Figura 87 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP08 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 88 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o corpo de prova 09 – CP09. A Figura 88a demonstra a vista isométrica, a Figura 88b a vista frontal e a Figura 88c a vista traseira.

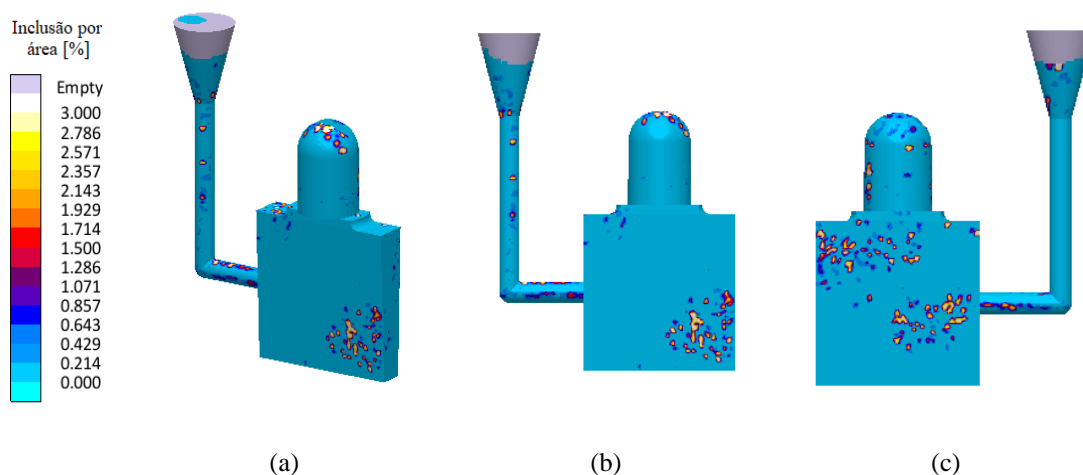


Figura 88 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP09 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 89 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o corpo de prova 10 - CP10. A Figura 89a demonstra a vista isométrica, a Figura 89b a vista frontal e a Figura 89c a vista traseira.

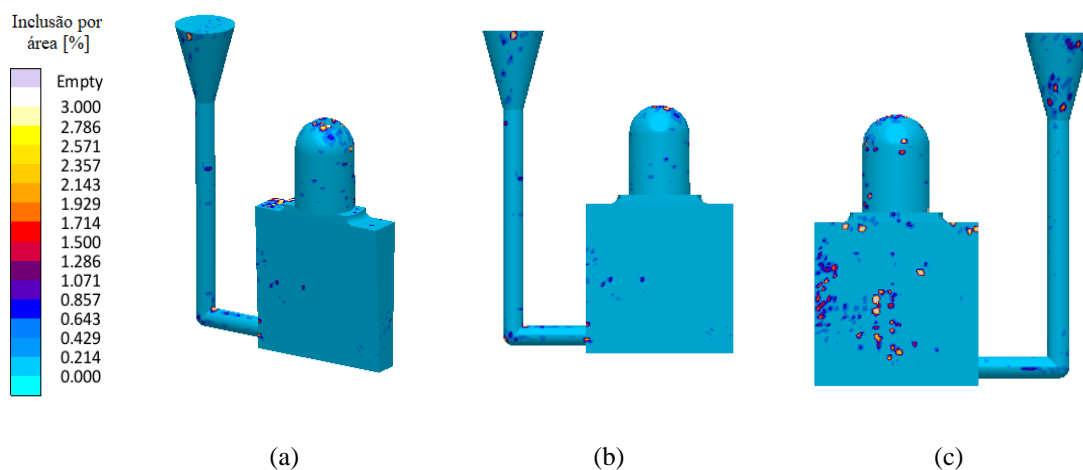
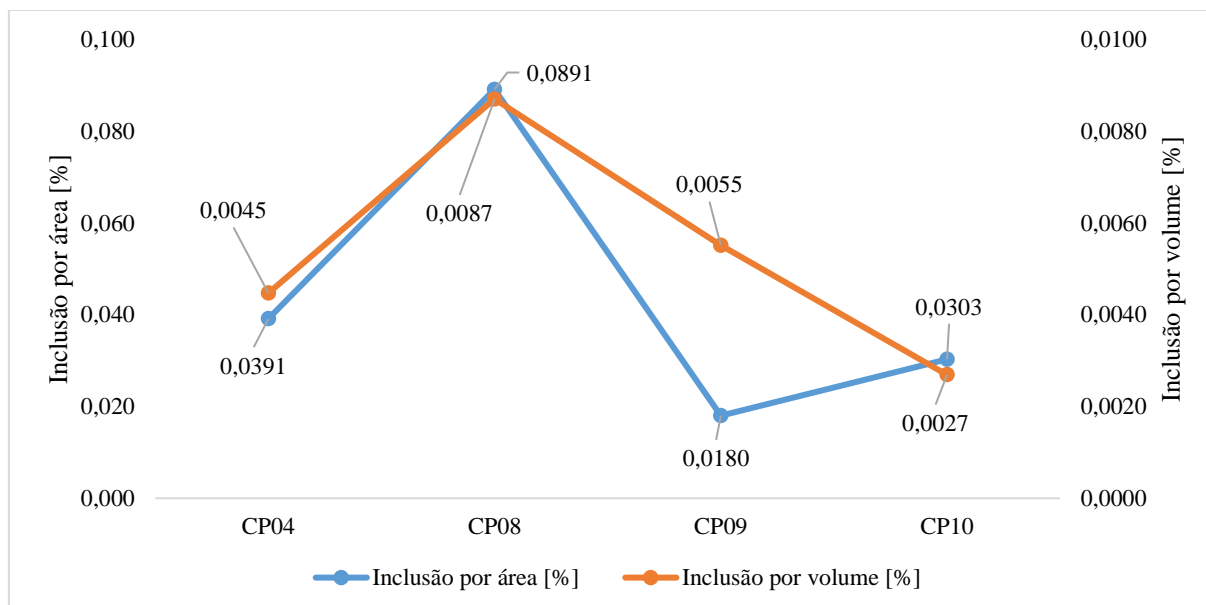


Figura 89 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP10 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

Analisando as imagens obtidas para geração 02 no resultado de inclusão por área [%] foi observado uma contaminação superficial decrescente do CP08 até o CP10, essa decrescente de inclusão percentual por área pode ser atribuída ao efeito cachoeira gerado pelo metal líquido na entrada da cavidade do molde, dependente do ponto de ataque.

O Gráfico 6 demonstra os resultados obtidos via MAGMAsteel® para a geração 02, contemplando os valores específicos para inclusão por área [%] e inclusão por volume [%].

Gráfico 6 - Análise gráfica – Etapa 02 - Resultados MAGMAsteel® – Geração 02



Analisando o Gráfico 6 foi observado uma redução percentual de 56%, 80% e 66% respectivamente para os corpos de prova CP04, CP09 e CP10 em comparação ao CP08 para o resultado de inclusão por área [%].

Para o resultado de inclusão por volume [%] foi observado uma redução percentual de 49%, 37% e 69% respectivamente para os corpos de prova CP04, CP09 e CP10 em comparação ao CP08.

O melhor resultado obtido para inclusão por área [%] foi para o CP09 e para inclusão por volume [%] foi o CP10. De forma geral o gráfico apresenta características similares ao Gráfico 5 com queda de valores acentuada do CP08 até o CP10, com um ponto discrepante para inclusão por área [%] do CP09 e ambos os valores obtidos para o CP04 ficaram acima do CP10, característica essa não visualizada nos resultados obtidos do Gráfico 5.

A Figura 90 demonstra o resultado de aprisionamento de ar para simulação numérica do processo de fundição para a geração 03. A Figura 90a demonstra o resultado para o CP11, a Figura 90b para o CP12, a Figura 90c para o CP13 e a Figura 90d para o CP14.

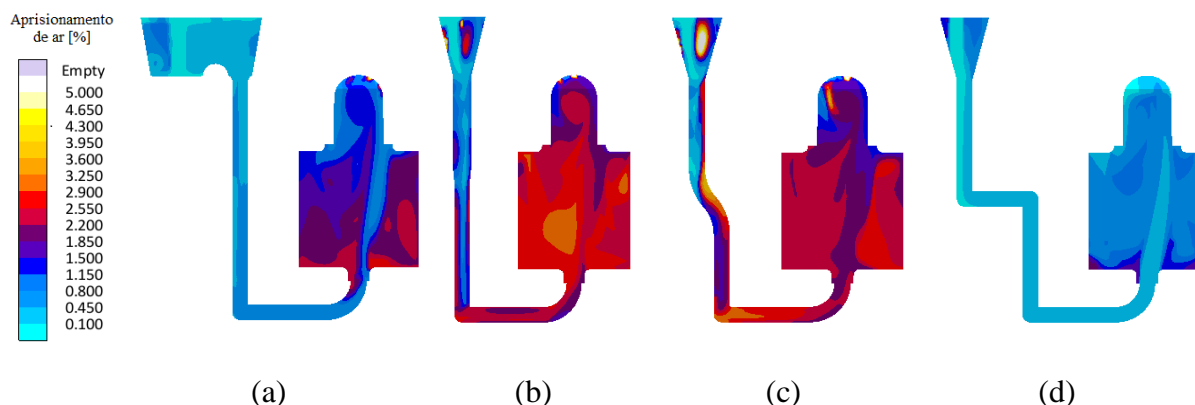


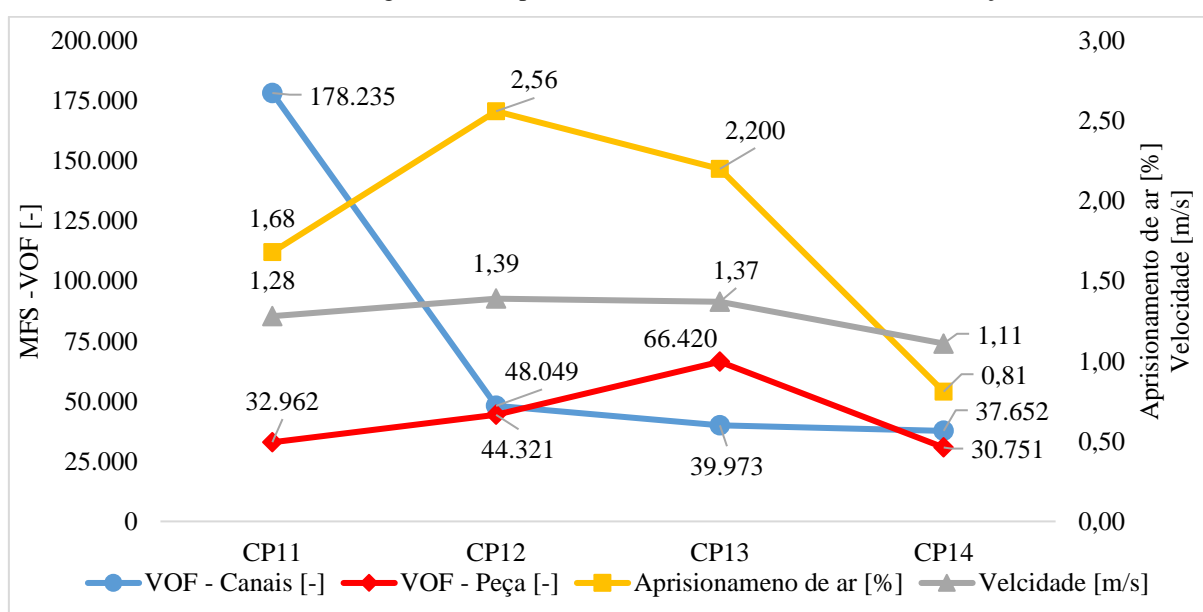
Figura 90 - Aprisionamento de ar do MAGMASOFT® (a) CP11, (b) CP12, (c) CP13 e (d) CP14

Analisando os resultados obtidos para o aprisionamento de ar [%] da Figura 90 foi possível observar que o CP11 com quebra de fluxo promove perda de pressão do metal líquido na queda vertical, levando a maiores superfícies de metal exposta ao ar no canal de descida devido a despressurização excessiva do sistema.

O CP14 apresentou os melhores resultados para sua geração, a quebra de fluxo na queda vertical do metal líquido proporciona redução da velocidade e pressurização do sistema, fazendo também com que ele estabilize o fluxo de entrada na cavidade.

Os resultados obtidos para geração 03 do MAGMASOFT® foram demonstrados no Gráfico 7 para concluir a análise visual do resultado de aprisionamento de ar [%] e velocidade [m/s].

Gráfico 7 - Análise gráfica – Etapa 01 - Resultados MAGMASOFT® – Geração 03



Analisando o Gráfico 7 foi observado uma redução percentual de 56%, 50% e 68% respectivamente para os corpos de prova CP12, CP13 e CP14 em comparação ao CP11 para o resultado somatório da superfície de metal exposta ao ar [-].

Para o resultado de aprisionamento de ar [%] foi observado uma redução de percentual de 34%, 14% e 68% respectivamente para os corpos de prova CP11, CP13 e CP14 em comparação ao CP12.

Para o resultado de velocidade [m/s] foi observado uma redução percentual de 8%, 1% e 20% respectivamente para os corpos de prova CP11, CP13 e CP14 em comparação para o CP12.

O sistema de enchimento com a utilização de uma bacia de vazamento (CP11) apresentou um alto valor VOF – Canais [-], a restrição de fluxo imposto pela bacia de vazamento fez com que houvesse perda de energia cinética vertical, porém essa perda levou a despressurização do sistema de canais, levando a necessidade de um maior tempo de enchimento, tendo como resultado maiores superfícies de metal exposta ar e retendo ar no meio líquido, com a perda elevada dessa energia foi alcançado um baixo valor para VOF – Peça [-] devido ao fato de que o metal líquido entra com menor velocidade na cavidade do molde.

É válido ressaltar que a utilização da bacia de vazamento em escala industrial proporciona alta repetibilidade no processo, visto que elimina a pressão hidrostática oriunda da panela homogeneizando a taxa de vazamento.

Para o CP12 foi possível observar que no decorrer do processo de enchimento a elevação da área de entrada do metal líquido pelo aumento da manilha para Ø50 levaria a necessidade de maiores taxas de vazão, para a vazão fixada torna-se maior a área de exposição superficial do metal líquido, devido a despressurização do sistema, visualizado pelo aumento do resultado VOF – Canais [-].

Para o CP13 a quebra de fluxo realizada por curvas a 45° se mostrou eficiente, porém sem tamanha efetividade se comparado ao CP14, foi possível observar maior velocidade do metal líquido na entrada da cavidade do molde, tal configuração geométrica não promoveu a pressurização do sistema de canais.

O CP14 que possui o mesmo conceito de quebra de fluxo do metal líquido na queda vertical (similar ao conceito da bacia de vazamento do CP11) oriundo da panela de vazamento, além de apresentar baixo resultado de VOF – Canais [-], por não elevar a quantidade de metal líquido consideravelmente e elevando a pressurização o sistema, também apresentou os melhores resultados entre a geração 03, para VOF – Peça [-] e aprisionamento de ar [%].

A mudança brusca no perfil do canal pode não ser prejudicial ao sistema de enchimento se o mesmo promover a pressurização e redução da velocidade do metal líquido, sem a criação de elevadas regiões de baixa pressão, evitando assim turbulências excessivas na entrada do metal líquido na cavidade do molde e retenção de ar no meio líquido.

A Figura 91 demonstra o resultado visual de diâmetro, localização e aglomeração de inclusões para simulação numérica do processo de fundição da geração 03. A Figura 91a demonstra o resultado para o CP11, a Figura 91b para o CP12, a Figura 91c para o CP13 e a Figura 91d para o CP14.

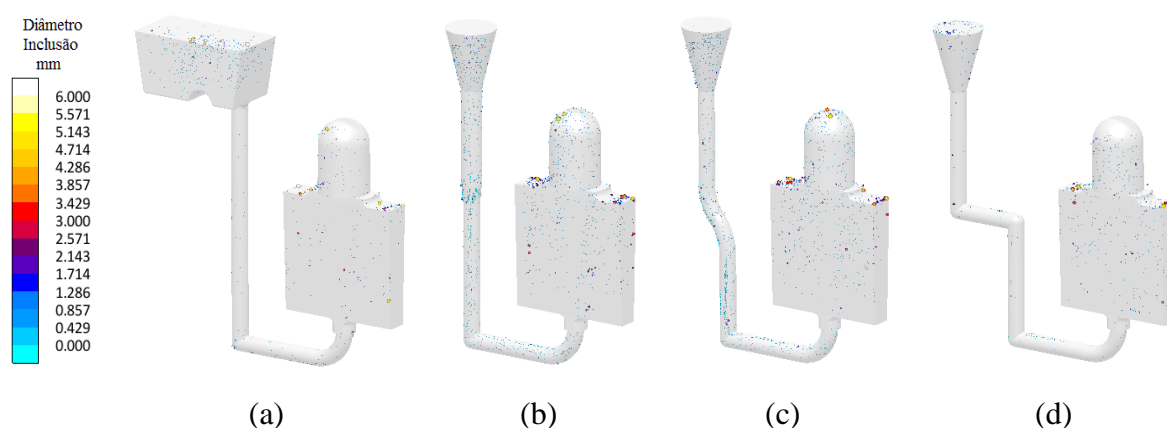


Figura 91 - Diâmetro, localização e aglomeração de inclusões de reoxidação do MAGMAsteel® (a) CP11, (b) CP12, (c) CP13 e (d) CP14

Analisando a Figura 91 foi observado que o CP11 e CP14 não apresentaram grandes volumes de inclusões na face superior assim como uma menor quantidade das mesmas distribuídas ao longo do corpo de prova se comparados ao CP12 e CP13

A Figura 92 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o corpo de prova 11 - CP11. A Figura 92a demonstra a vista isométrica, a Figura 92b a vista frontal e a Figura 92c a vista traseira.

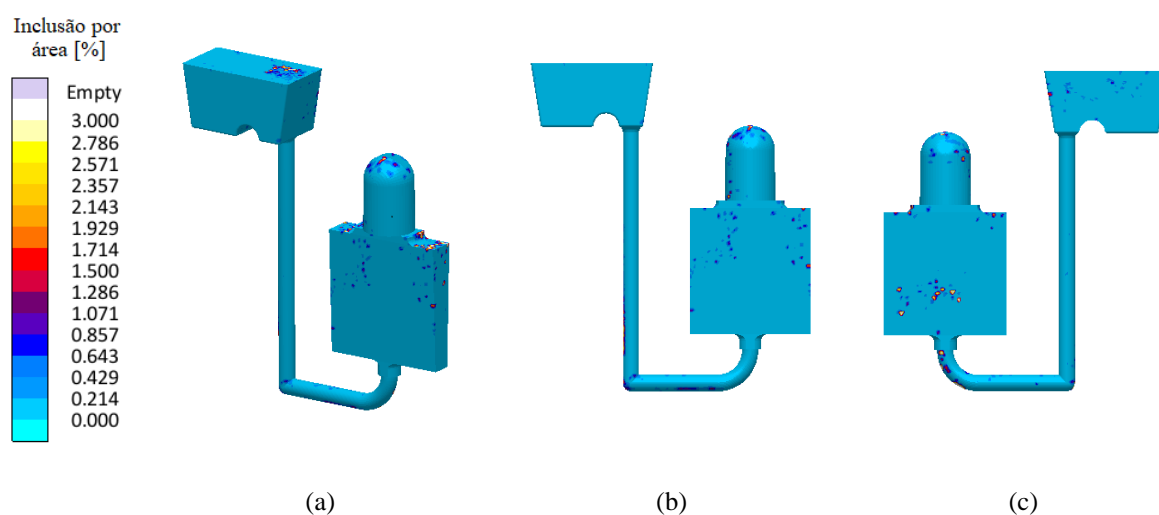


Figura 92 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP11 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 93 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o corpo de prova 12 - CP12. A Figura 93a demonstra a vista isométrica, a Figura 93b a vista frontal e a Figura 93c a vista traseira.

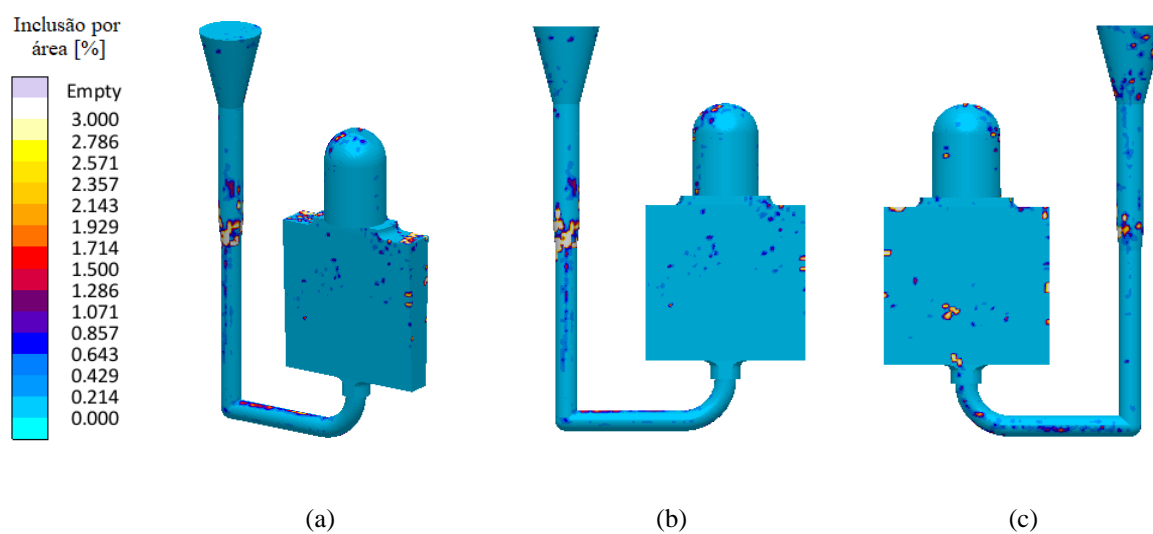


Figura 93 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP12 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 94 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o corpo de prova 13 - CP13. A Figura 94a demonstra a vista isométrica, a Figura 94b a vista frontal e a Figura 94c a vista traseira.

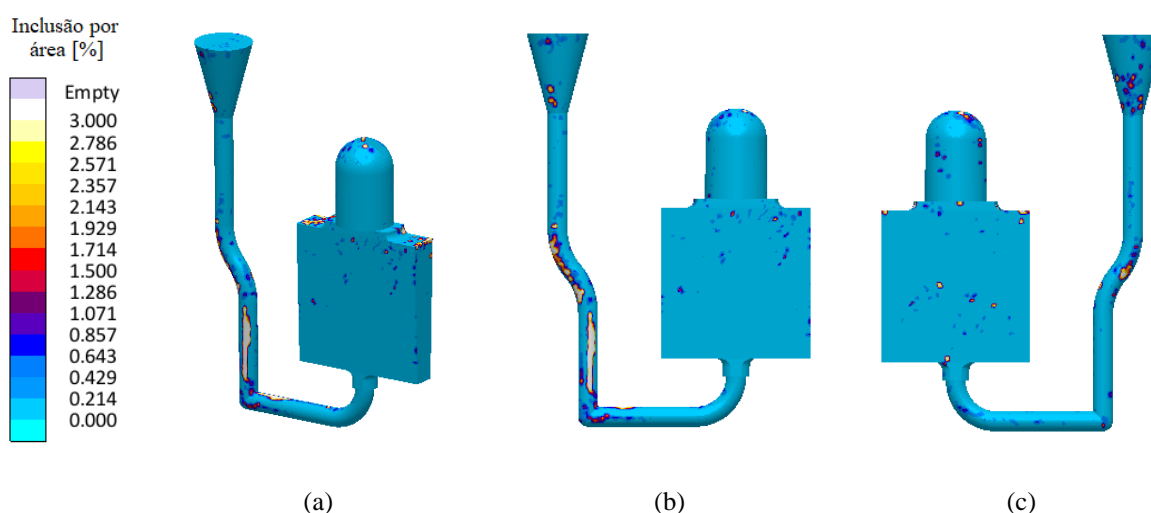


Figura 94 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP13 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 95 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o corpo de prova 14 - CP14. A Figura 95a demonstra a vista isométrica, a Figura 95b a vista frontal e a Figura 95c a vista traseira.

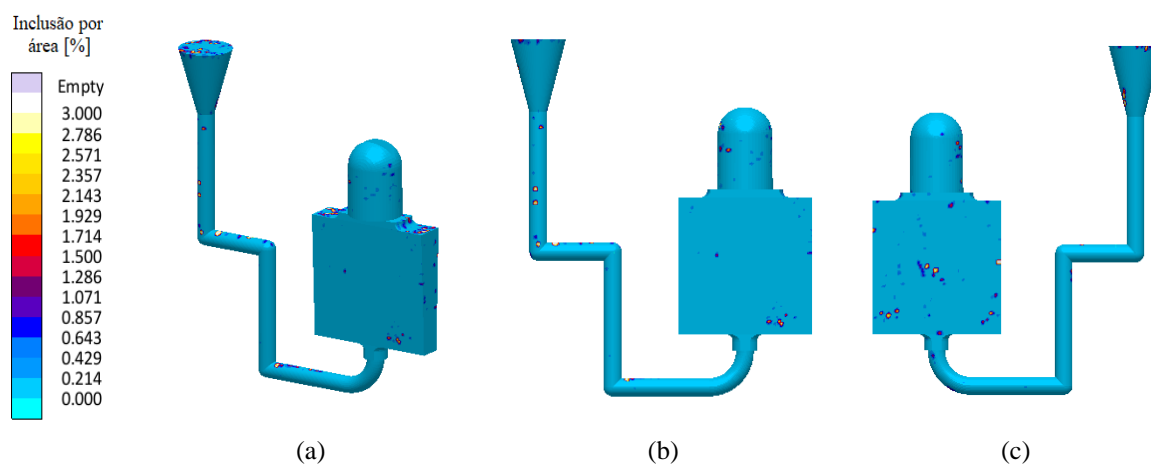
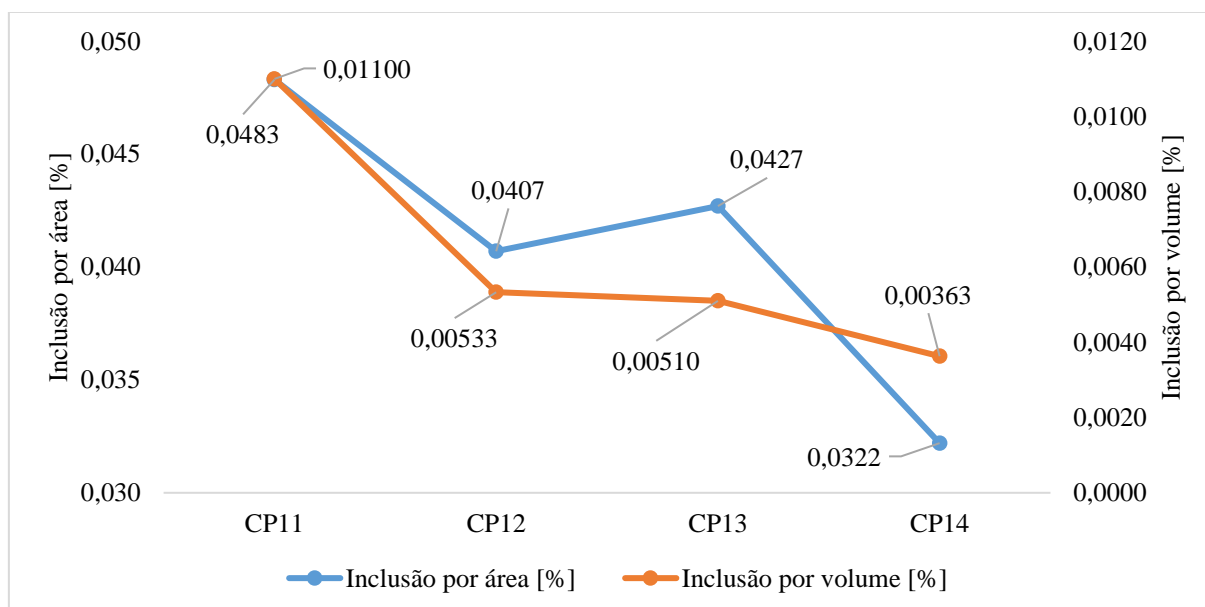


Figura 95 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP14 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

Analisando as imagens obtidas para geração 03 no resultado de inclusão por área [%] foi possível observar uma menor área superficial tomada por inclusões de reoxidação para o CP14 se comparado com os demais corpos de prova de sua geração etambém com os demais resultados obtidos até essa geração. Esse resultado visual expressivo também pode ser observado nos valores obtidos do Gráfico 7 para superfície de metal exposta ao ar [-] e percentual de aprisionamento de ar [%] e no Gráfico 8 para inclusão por área [%] e inclusão por volume [%].

O Gráfico 8 demonstra os resultados obtidos via MAGMAsteel® para a geração 03, contemplando os valores específicos para inclusão por área [%] e inclusão por volume [%].

Gráfico 8 - Análise gráfica – Etapa 02 - Resultados MAGMAsteel® – Geração 03



Analisando o Gráfico 8 foi observado uma redução percentual de 16%, 12% e 33% respectivamente para os corpos de prova CP12, CP13 e CP14 em comparação ao CP11 para o resultado de inclusão por área [%].

Para o resultado de inclusão por volume [%] foi observado uma redução percentual de 52%, 54% e 67% respectivamente para os corpos de prova CP12, CP13 e CP14 em comparação ao CP11.

Analisando o Gráfico 8 foi possível observar a melhora para os resultados de inclusão por área [%] e inclusão por volume [%] obtidos para o CP14. Os resultados obtidos neste gráfico possuíram características similares aos resultados aos resultados obtidos no Gráfico 7, principalmente em relação aos resultados obtidos para o somatório de superfície de metal exposta ao ar [-].

A Figura 96 demonstra o resultado visual de aprisionamento de ar [%] para simulação numérica do processo de fundição para a geração 04. A Figura 96a demonstra o resultado para o CP15, a Figura 96b para o CP16, a Figura 96c para o CP17 e a Figura 96d para o CP18.

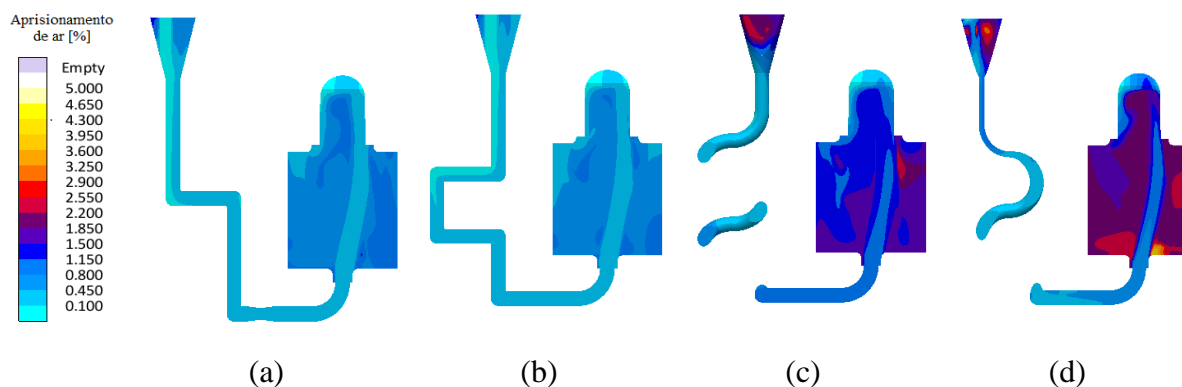


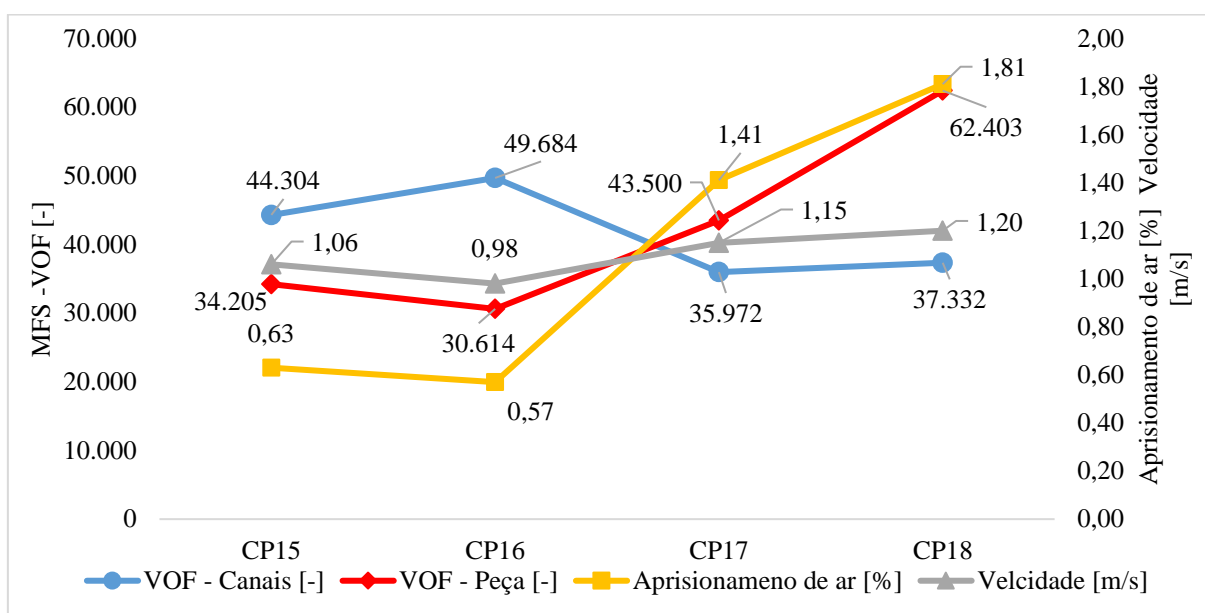
Figura 96 - Aprisionamento de ar do MAGMASOFT® (a) CP15, (b) CP16, (c) CP17 e (d) CP18

O CP16 foi desconsiderado já que na análise da simulação ocorreu o esgotamento do funil cônico, significando que a restrição de fluxo imposta pela segunda quebra de fluxo estrangula excessivamente o sistema de enchimento, o funil completamente cheio não é obtido em prática de fundição pelo processo usual de fundição por gravidade.

Analisando os resultados obtidos para o aprisionamento de ar [%] da Figura 96 e desconsiderando os resultados obtidos para o CP16, foi possível observar que o sistema de canais do CP15 bastante similar ao CP14 se mostrou novamente efetivo para redução percentual média de aprisionamento de ar [%]. O sistema helicoidal do CP17 e CP18 se mostraram promissores para redução de tal resultado, porém a restrição geométrica das manilhas refratárias impossibilitou avaliações mais detalhadas.

Os resultados obtidos para geração 04 do MAGMASOFT® foram demonstrados no Gráfico 9 para concluir a análise visual do resultado de aprisionamento de ar [%] e velocidade [m/s].

Gráfico 9 - Análise gráfica – Etapa 01 - Resultados MAGMASOFT® – Geração 04



Analisando o Gráfico 9 foi observado uma redução percentual de 21% e 20% respectivamente para o CP15 e CP17 em comparação ao CP18 para o resultado somatório da superfície de metal exposta ao ar [-].

Para o resultado de aprisionamento de ar [%] foi observado uma redução percentual de 65% e 22% respectivamente para o CP15 e CP17 em comparação ao CP18.

Para o resultado de velocidade [m/s] foi observado uma redução percentual de 12% e 4% respectivamente para o CP15 e CP17 em comparação ao CP18.

A restrição de fluxo imposta no CP15 não mostrou eficiência se comparado ao CP14, já que apresentou maiores valores de superfície de metal exposta ao para VOF – Canais [-] e VOF – Peça [-]. Após a restrição de fluxo o metal foi acelerado no sistema de canais horizontal (canal de distribuição), despressurizando o mesmo pela criação de regiões de baixa pressão, elevando a superfície de metal exposta ao ar para os canais e elevando a turbulência do metal líquido na entrada da cavidade do molde.

O CP17 e CP18 apresentaram potencial para sistemas de enchimento por gravidade, já que os mesmos demonstraram baixo valor de VOF – Canais, mas a restrição geométrica das manilhas refratárias impossibilita maiores estudos sobre o sistema de enchimento helicoidal propostos por Sama, Badamo, Lynch e Manogharan [38], além de elevarem a dificuldade de montagem na prática de moldagem convencional.

Figura 97 demonstra o resultado de diâmetro, localização e aglomeração de inclusões para simulação numérica do processo de fundição da geração 04.

A Figura 97a demonstra o resultado para o CP15, a Figura 97b para o CP16, a Figura 97c para o CP17 e a Figura 97d para o corpo de prova 18 – CP18.

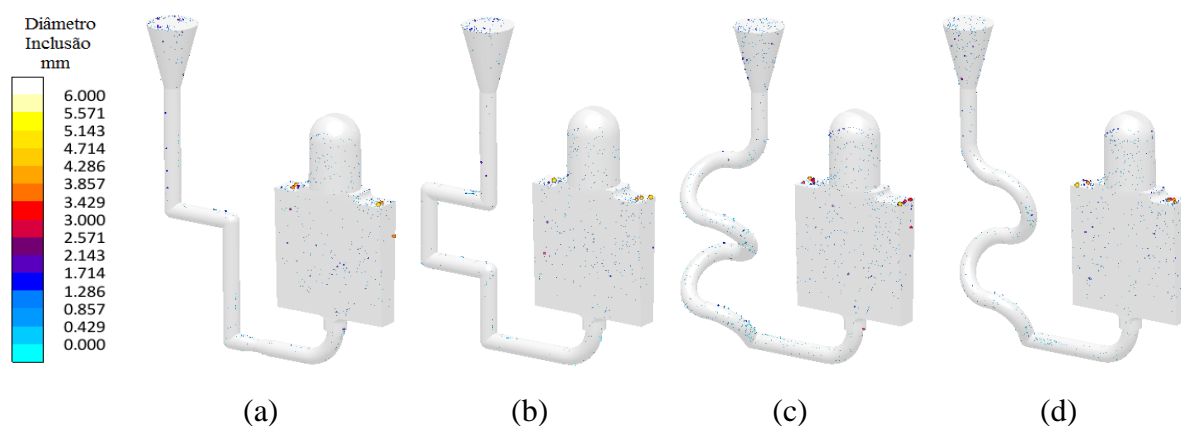


Figura 97 - - Diâmetro, localização e aglomeração de inclusões de reoxidação do MAGMAsteel® (a) CP15, (b) CP16, (c) CP17 e (d) CP18

Analisando a Figura 97 foi observado que o CP15 apresentou características bastante similares ao CP14 da geração 03, o CP16 foi desconsiderado para análises e os corpos de prova CP17 e CP18 (sistemas helicoidais) possuem potencial de otimização se forem possíveis de serem trabalhados com maior liberdade geometria, devido ao baixo número de inclusões distribuídas ao longo do corpo de prova.

A Figura 98 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o CP15. A Figura 98a demonstra a vista isométrica, a Figura 98b a vista frontal e a Figura 98c a vista traseira.

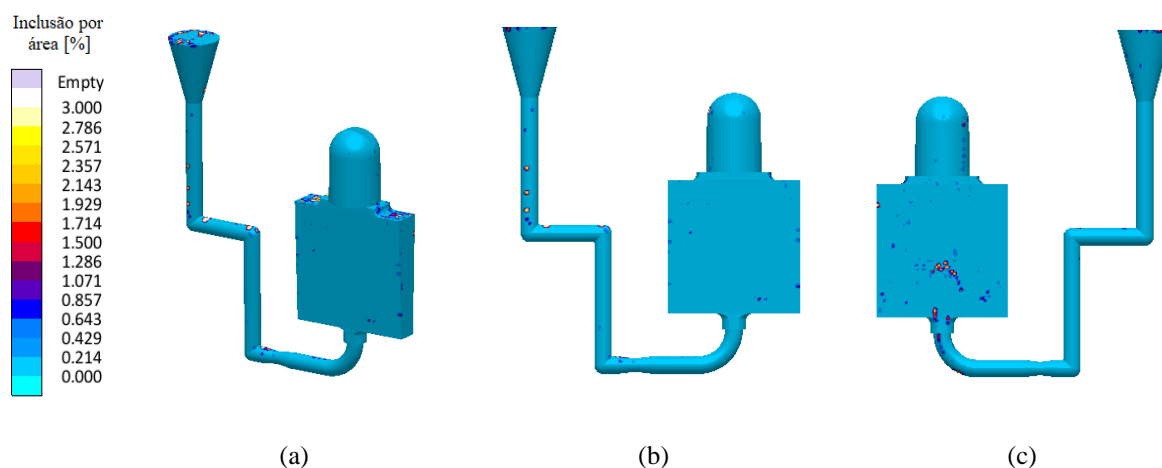


Figura 98 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o corpo de prova 15 - CP15 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 99 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o CP16. A Figura 99a demonstra a vista isométrica, a Figura 99b a vista frontal e a Figura 99c a vista traseira.

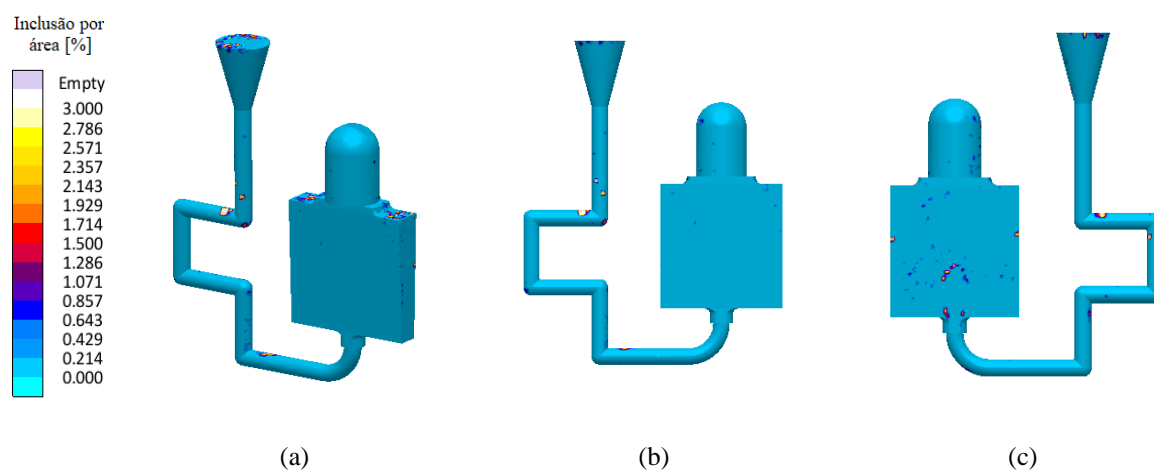


Figura 99 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP16 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 100 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o CP17. A Figura 100a demonstra a vista isométrica, a Figura 100b a vista frontal e a Figura 100c a vista traseira.

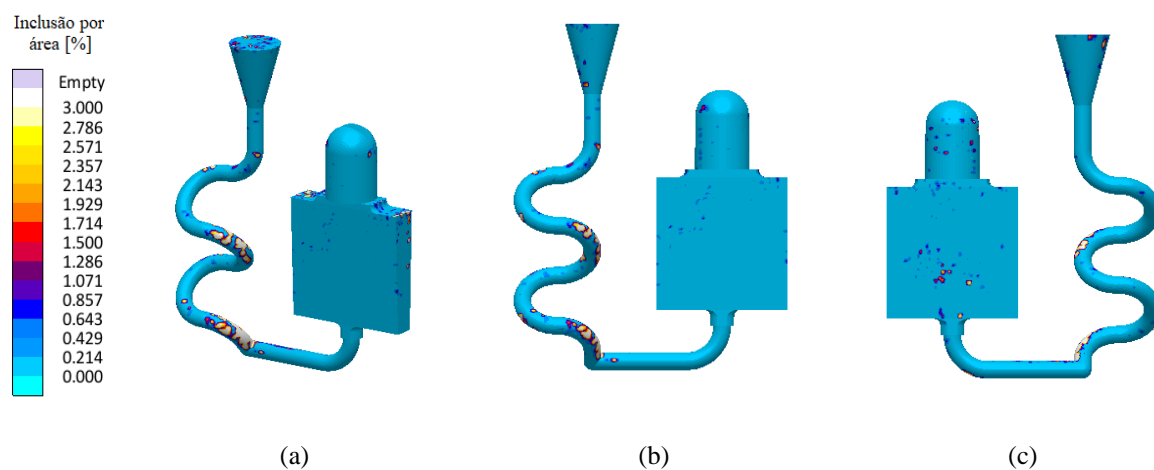


Figura 100 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP17 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 101 demonstra o resultado de inclusão por área [%] para o CP18. A Figura 101a demonstra a vista isométrica, a Figura 101b a vista frontal e a Figura 101c a vista traseira.

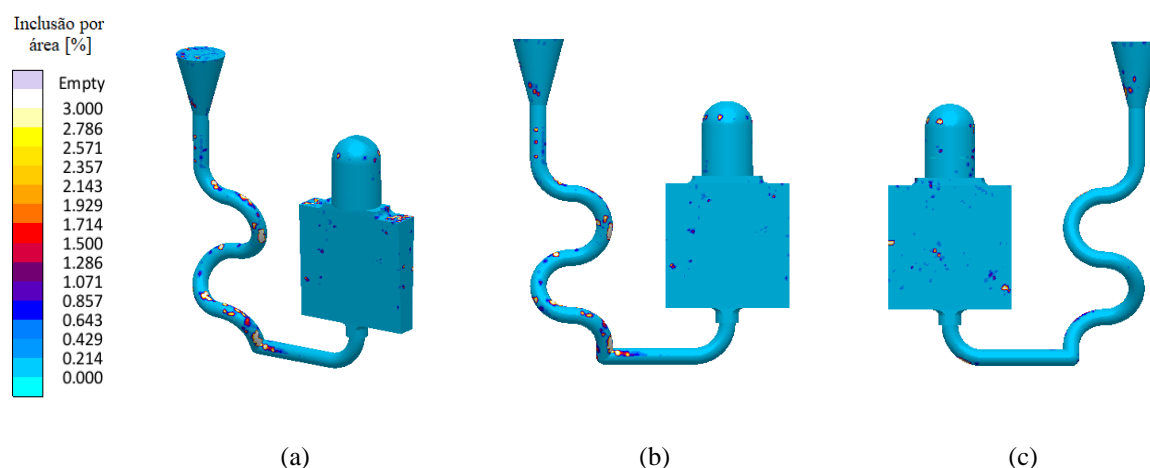
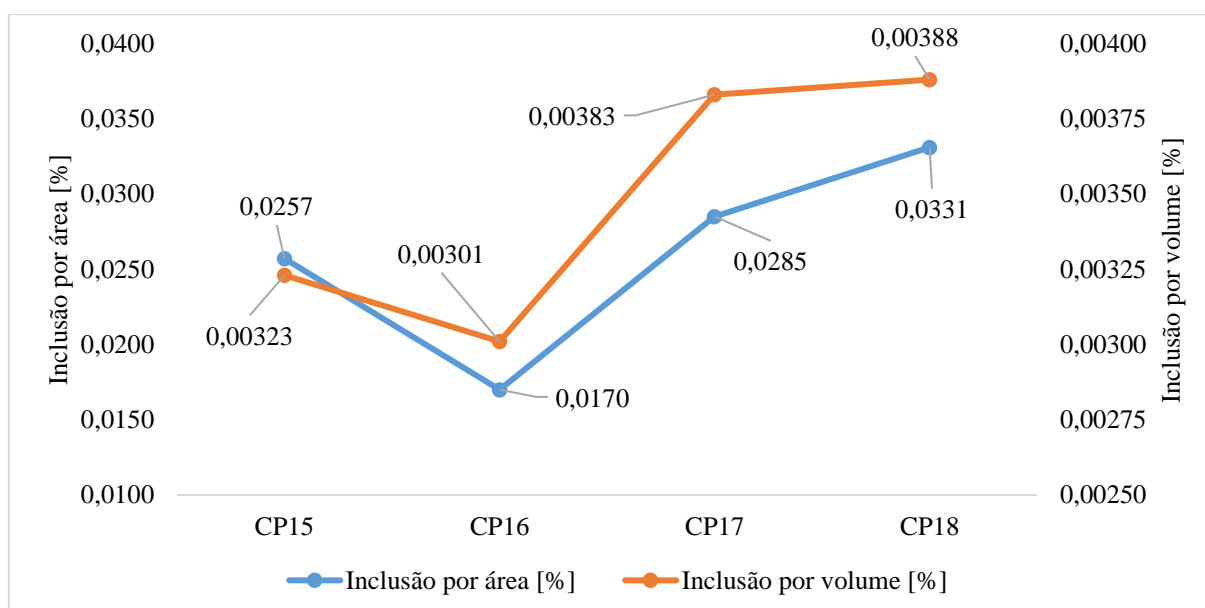


Figura 101 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP18 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

Analisando as imagens obtidas para geração 04 no resultado de inclusão por área [%] foi possível observar que o CP15 apresentou resultados semelhantes ao CP14, já que não houve alteração significativa entre os projetos. Novamente os sistemas helicoidais se forem trabalhos com maior liberdade geométrica podem apresentar viabilidade em componentes que necessitam de alto desempenho mecânico, ou que não possam ser recuperados pelo processo de soldagem, visto que os mesmos também apresentaram baixo volume percentual de inclusão por área.

O Gráfico 10 demonstra os resultados obtidos via MAGMAsteel® para a geração 04, contemplando os valores específicos para inclusão por área [%] e inclusão por volume [%].

Gráfico 10 - Análise gráfica – Etapa 02 - Resultados MAGMAsteel® – Geração 04



Analisando o Gráfico 10 foi observado uma redução percentual de 22% e 14% respectivamente para o CP15 e CP17 em comparação ao CP18 para o resultado de inclusão por área [%].

Para o resultado de inclusão por volume [%] foi observado uma redução percentual de 17% e 1% respectivamente para o CP15 e CP17 em comparação ao CP18.

Os melhores resultados obtidos para inclusão por área [%] e inclusão por volume [%] foram para o CP15. Desconsiderando os resultados obtidos para o CP16 o

Gráfico 10 apresentou similaridade ao Gráfico 9 para os resultados analisados.

A Figura 102 demonstra o resultado visual de aprisionamento de ar para a SNPFM para a geração 05. A Figura 102a demonstra o resultado para o CP19, a Figura 102b para o CP20, a Figura 102c para o CP21 e para a Figura 102d para o CP22.

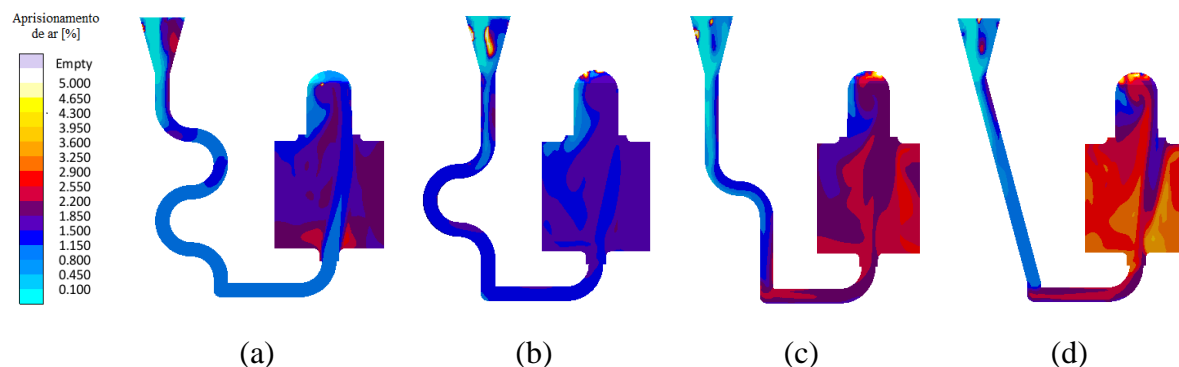
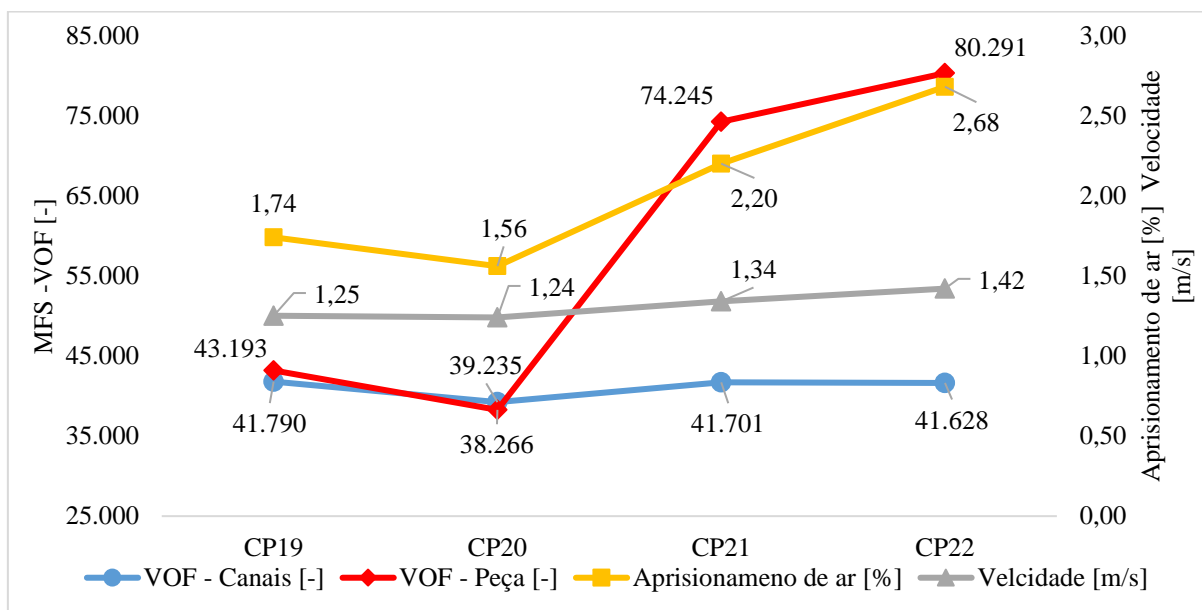


Figura 102 - Aprisionamento de ar do MAGMASOFT® (a) CP19, (b) CP20, (c) CP21 e (d) CP22

Analisando os resultados obtidos para o aprisionamento de ar [%] da Figura 102 foi possível observar que tal geração não se mostrou eficiente para otimização dos resultados. O melhor resultado obtido foi para o CP20, porém as reduções realizadas por manilhas curvas ou inclinação do canal não mostraram tamanha eficiência se comparados as quebras de fluxo realizadas por cotovelo, conforme CP14 ou pela realização de canais em formato helicoidal, conforme o CP17 e CP18.

Os resultados obtidos para geração 05 do MAGMASOFT® foram demonstrados no Gráfico 11 para concluir a análise visual do resultado de aprisionamento de ar [%] e velocidade [m/s].

Gráfico 11 - Análise gráfica – Etapa 01 - Resultados MAGMASOFT® – Geração 05



Analisando o Gráfico 11 foi observado uma redução percentual de 30%, 36% e 5% respectivamente para o CP19, CP20 e CP21 em comparação ao CP22 para o resultado somatório da superfície de metal exposta ao ar [-].

Para o resultado de aprisionamento de ar [%] foi observado uma redução percentual de 35%, 42% e 18% respectivamente para o CP19, CP20 e CP21 em comparação ao CP22.

Para o resultado de velocidade [m/s] foi observado uma redução percentual de 12%, 13% e 6% respectivamente para o CP19, CP20 e CP21 em comparação ao CP22.

O CP19 e CP20 apresentaram potencial para redução do resultado da superfície de metal exposta ao ar [-], foi observado que os mesmos não trabalham como redutores de fluxo, mas sim como direcionadores, obtendo reduções similares, mas não tão boas quanto para o corpo de prova 14 – CP14.

O CP21 assim como o CP22 proporcionou a estabilidade do fluxo nos canais de descida, mas não reduziram a turbulência do material na entrada da cavidade do molde, fazendo com que o resultado de superfície de metal exposta ao ar para peça (VOF – Peça [-]) eleve consideravelmente, assim como os resultados de aprisionamento de ar [%].

A Figura 103 demonstra o resultado de diâmetro, localização e aglomeração de inclusões para simulação numérica do processo de fundição da geração 05. A Figura 103a demonstra o resultado para o CP19, a Figura 103b para o CP20, a Figura 103c para o CP21 e a Figura 103d para o CP22.

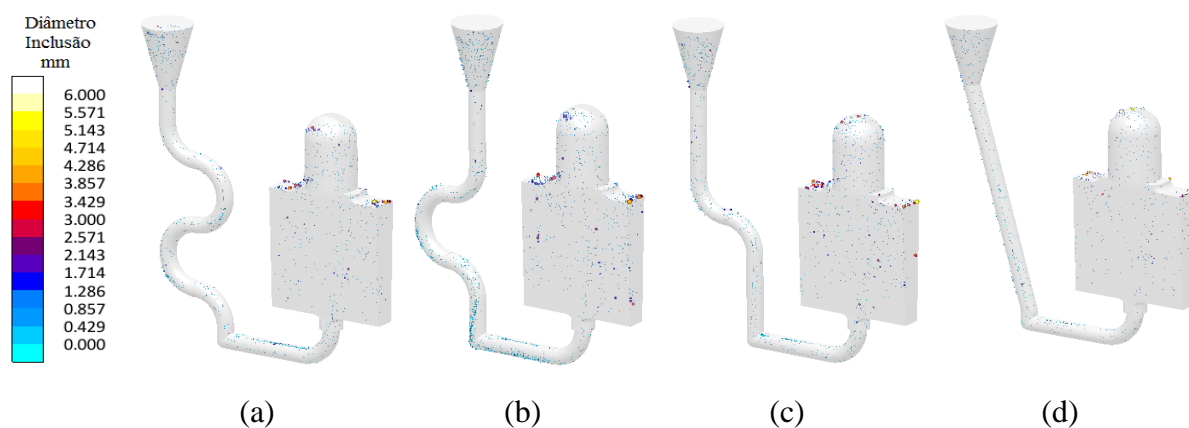


Figura 103 - Diâmetro, localização e aglomeração de inclusões de reoxidação do MAGMAsteel® (a) CP19, (b) CP20, (c) CP21 e (d) CP22

Analisando a Figura 103 foi observado que a quebra de fluxo pela utilização de curvas (CP19, CP20 e CP21) não mostrou tamanha eficiência se comparadas a utilização de cotovelos (CP14), a configuração utilizada para o CP22 acelerou a velocidade do metal líquido na queda vertical, sem restrição de fluxo elevando a turbulência da entrada do metal líquido, elevando o número de inclusões de pequeno tamanho.

A Figura 104 demonstra o resultado de inclusão por área para o CP19. A Figura 104a demonstra a vista isométrica, a Figura 104b a vista frontal e a Figura 104c a vista traseira.

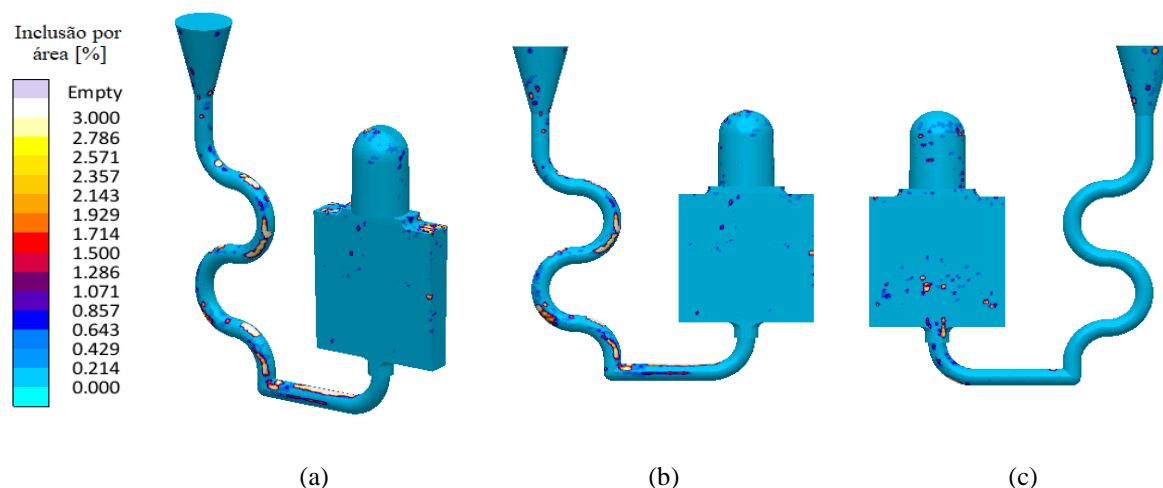


Figura 104 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP19 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 105 demonstra o resultado de inclusão por área para o CP20. A Figura 105a demonstra a vista isométrica, a Figura 105b a vista frontal e a Figura 105c a vista traseira.

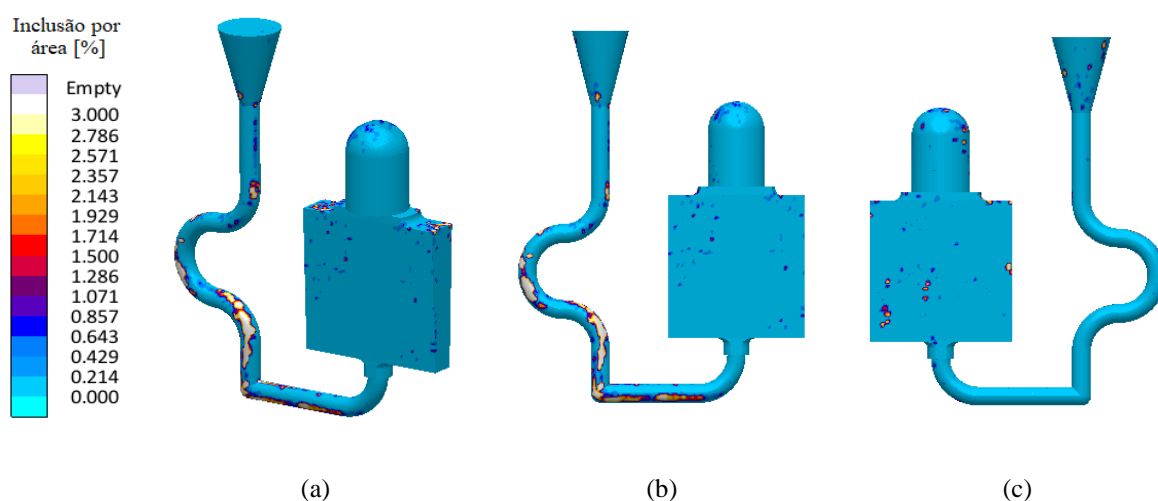


Figura 105 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP20 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 106 demonstra o resultado de inclusão por área para o CP21. A Figura 106a demonstra a vista isométrica, a Figura 106b a vista frontal e a Figura 106c a vista traseira.

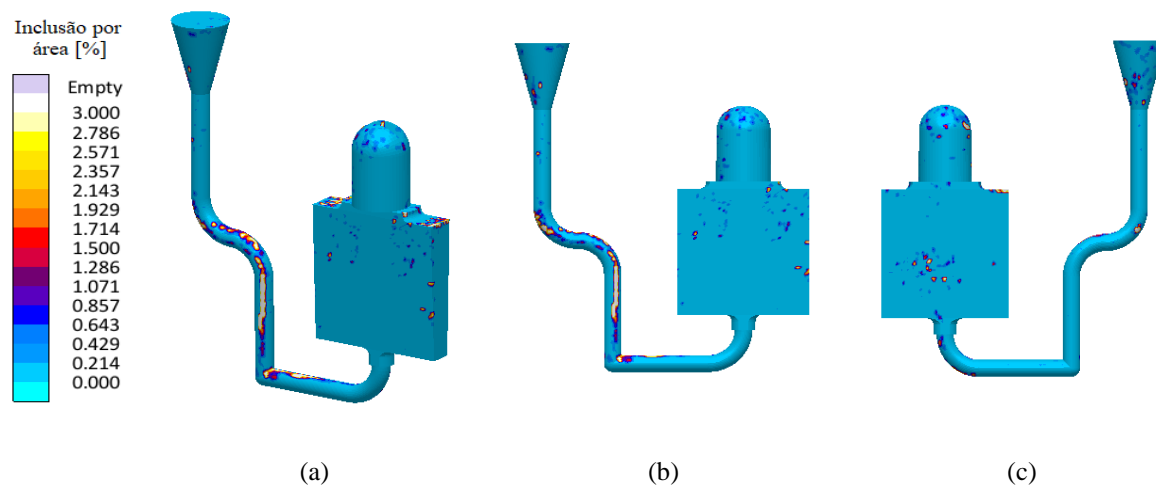


Figura 106 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP21 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

A Figura 107 demonstra o resultado de inclusão por área para o CP22. A Figura 107a demonstra a vista isométrica, a Figura 107b a vista frontal e a Figura 107c a vista traseira.

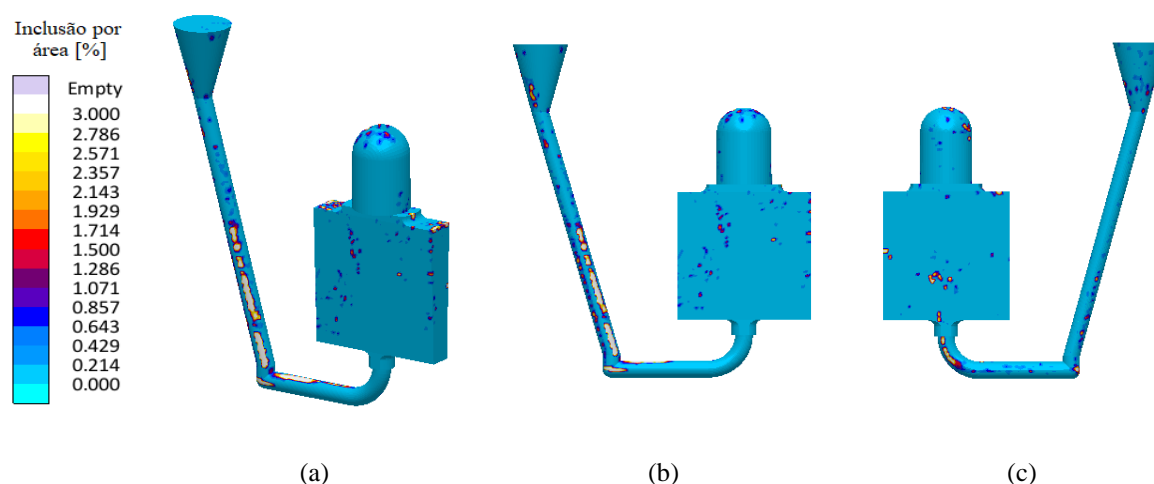
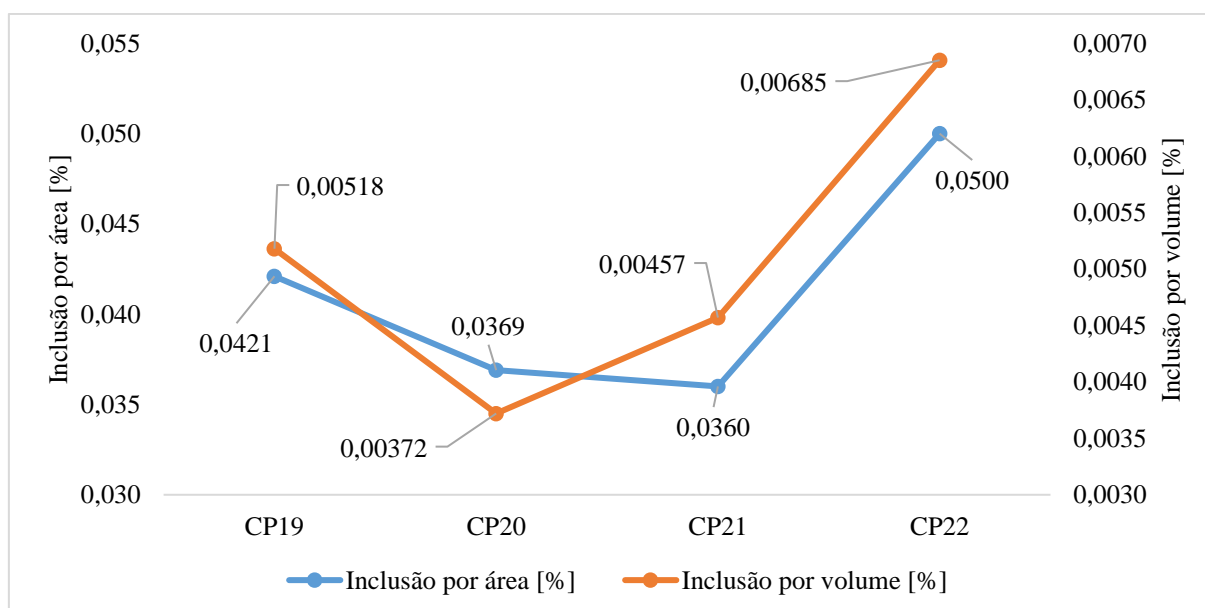


Figura 107 – Inclusão percentual por área do MAGMAsteel® para o CP22 (a) vista isométrica, (b) vista frontal e (c) vista traseira

Analisando as imagens obtidas para geração 05 no resultado de inclusão por área [%] foi observado que o direcionamento de fluxo na queda vertical do metal líquido deve ser estudado cuidadosamente, já que o excesso do mesmo, como no CP19 ou a falta destes no CP21 apresentaram resultados inferiores se comparados ao CP20. A inclinação do canal elevou os resultados obtidos para inclusão por área [%] devido a aceleração resultante do projeto empregado, observado principalmente pela turbulência gerada na entrada do metal líquido dentro da cavidade do molde.

O Gráfico 12 demonstra os resultados obtidos via MAGMAsteel® para a geração 05, contemplando os valores específicos para inclusão por área [%] e inclusão por volume [%].

Gráfico 12 - Análise gráfica – Etapa 02 - Resultados MAGMAsteel® – Geração 05



Analisando o Gráfico 12 foi observado uma redução percentual de 16%, 26% e 28% respectivamente para o CP19, CP20 e CP21 em comparação ao CP22 para o resultado de inclusão por área [%].

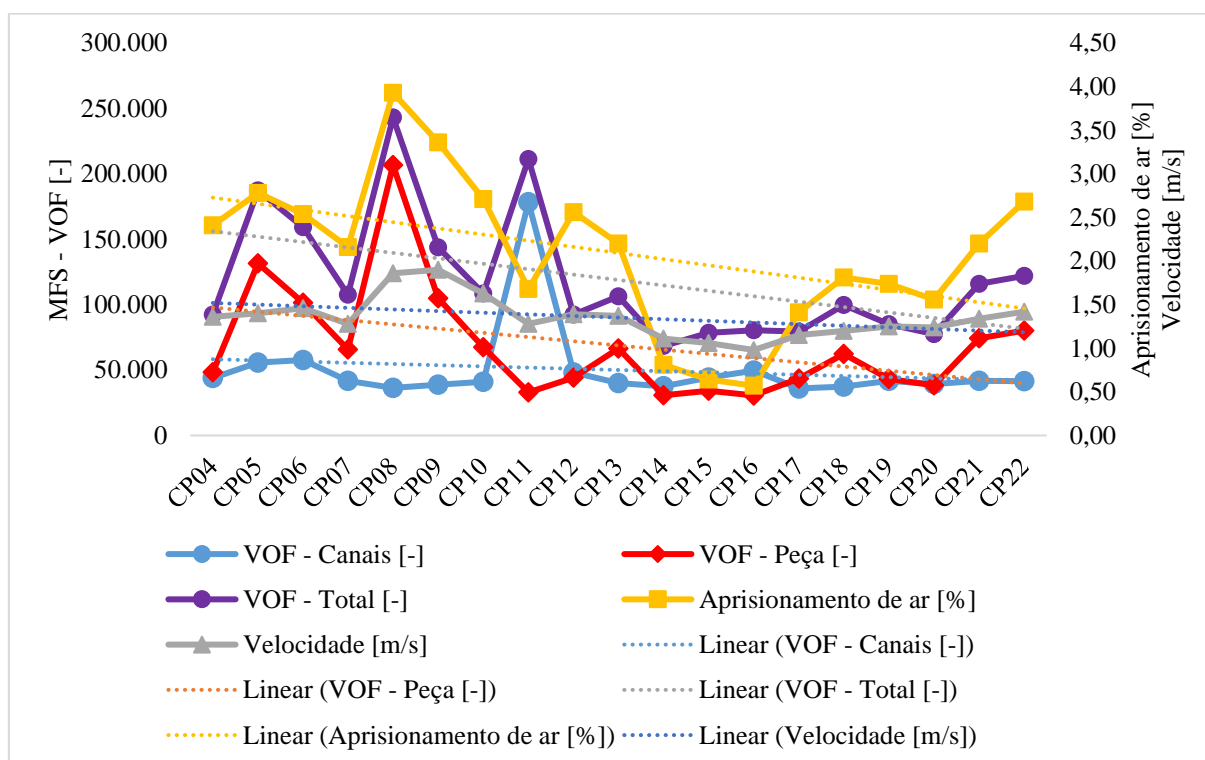
Para o resultado de inclusão por volume [%] foi observado uma redução percentual de 24%, 46% e 33% respectivamente para o CP19, CP20 e CP21 em comparação ao CP22.

O melhor resultado obtido para inclusão por área [%] foi para o CP21 e para a inclusão por volume [%] para o CP20. O Gráfico 12 apresentou características similares ao Gráfico 11, podendo observar pequena inversão de valores para inclusão por área entre o CP20 e CP21.

4.5 DEFINIÇÃO DOS PROJETOS PARA ANÁLISE PRÁTICA DE FUNDIÇÃO

O Gráfico 13 demonstra a plotagem dos resultados obtidos entre as gerações 01 a 05, em ordem sequencial da numeração dos corpos de prova para a etapa 01 (um) do processo de SNPFM.

Gráfico 13 - Análise gráfica – Etapa 01 - Resultados MAGMASOFT® - Geração 01 a 05



No Gráfico 13 foi observado que as linhas de tendência traçadas são decrescentes e possuem inclinação similar. Após o CP14 foi observado tendência de crescimento, é natural

que ocorram “picos e vales” de resultados no decorrer do desenvolvimento, visto que mudanças de estratégia possam melhorar, ou não, o estado atual do projeto.

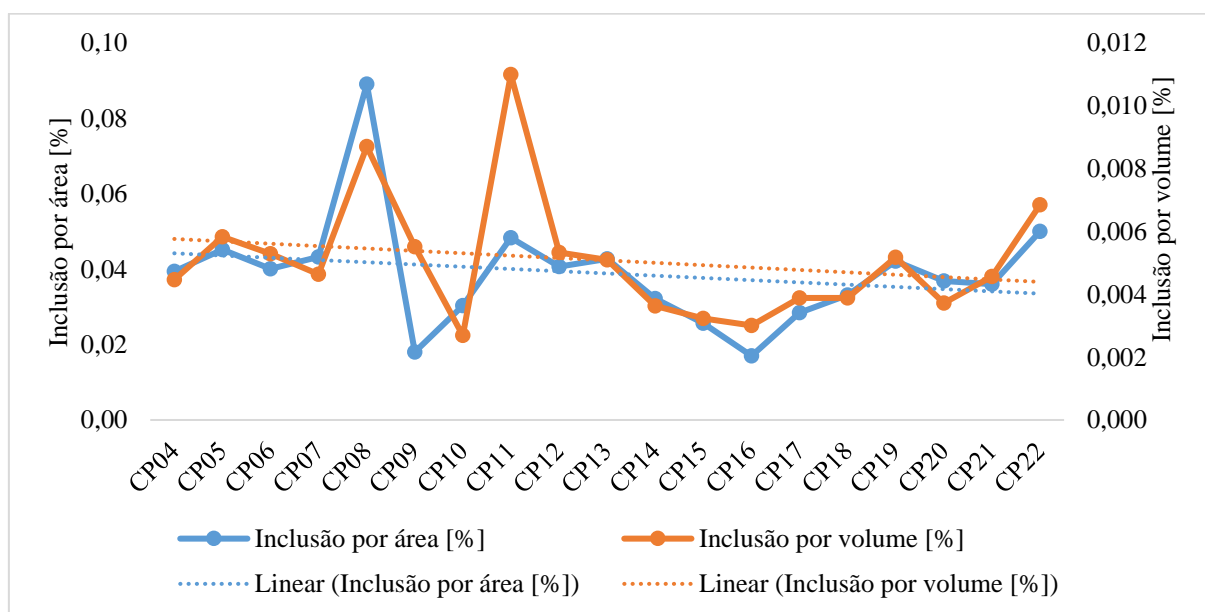
Nenhum dos designs estudados/propostos alcançou o objetivo da velocidade crítica proposto por Campbell [3], no qual a mesma deveria ser inferior a 0,5 m/s na parte inferior do canal (canal de ataque).

Analisando o somatório superfície de metal exposta ao ar (VOF – Total [-]) do Gráfico 13 foi possível observar uma diferença percentual em 255% entre resultados extremos (CP14 e CP08).

Analisando o Gráfico 13 foi observado tendência semelhante para os diferentes resultados avaliados, desta forma podemos afirmar que estes possuem correlação. A menor velocidade [m/s] tende a reduzir as superfícies de metal exposta ao ar [-] e consequentemente a admissão de ar no meio líquido (aprisionamento de ar [%]).

O Gráfico 14 demonstra a plotagem dos resultados obtidos entre as gerações 01 a 05, em ordem sequencial da numeração dos corpos de prova para etapa 02 (dois) do processo de simulação numérica do processo de fundição de metais.

Gráfico 14 - Análise gráfica – Etapa 02 - Resultados MAGMAsteel® – Geração 01 a 05



No Gráfico 14 foi observado que as linhas de tendência traçadas são decrescentes e possuem inclinação similar. Após o CP15, desconsiderando os resultados obtidos para o CP16, foi observado tendência de crescimento, o Gráfico 14 apresentou similaridade aos resultados obtidos do Gráfico 13.

Correlacionado o Gráfico 13 e Gráfico 14 foi possível verificar que os resultados estão interligados, a otimização dos resultados obtidos na etapa 01 (um) da metodologia aplicada levam consequentemente a melhores resultados de inclusão por área [%] e inclusão por volume [%]. Desta forma os resultados obtidos na etapa 02 (dois) da metodologia proposta serviram para refinamento dos resultados obtidos na etapa 01 (um) por proporcionarem além de resultados específicos para defeitos de reoxidação a previsão de localização dos defeitos.

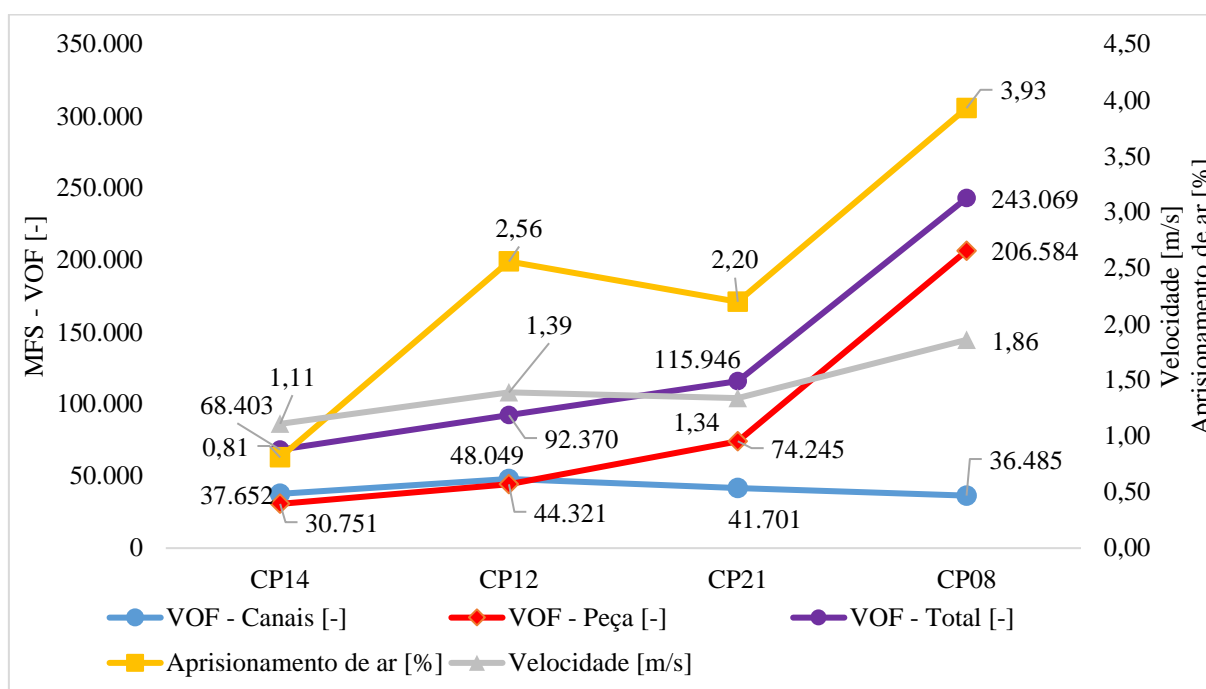
Após análise do Gráfico 13 os resultados foram plotados na Tabela 5 em forma crescente do resultado do somatório da superfície de metal exposta ao ar (VOF – Total) destacando os corpos de prova selecionados para prática de fundição.

Tabela 5 – Resultados tabelados da etapa 01 para as 05 gerações

CORPO DE PROVA	VOF - Canais [-]	VOF - Peça [-]	VOF - Total [-]	Aprisionamento de ar [%]	Velocidade [m/s]
CP14	37.652	30.751	68.403	0,81	1,11
CP20	39.235	38.266	77.501	1,56	1,24
CP15	44.304	34.205	78.509	0,64	1,06
CP17	35.972	43.500	79.472	1,41	1,15
CP16	49.684	30.614	80.298	0,57	0,98
CP19	41.790	43.193	84.983	1,74	1,25
CP12	48.049	44.321	92.370	2,56	1,39
CP04	43.996	48.448	92.444	2,41	1,36
CP18	37.332	62.403	99.735	1,81	1,20
CP13	39.973	66.420	106.393	2,20	1,37
CP07	41.762	65.808	107.570	2,16	1,28
CP10	41.113	67.428	108.541	2,71	1,63
CP21	41.701	74.245	115.946	2,20	1,34
CP22	41.628	80.291	121.919	2,68	1,42
CP09	38.875	104.942	143.817	3,36	1,90
CP06	57.696	101.388	159.084	2,54	1,46
CP05	55.594	131.649	187.243	2,78	1,40
CP11	178.235	32.962	211.197	1,68	1,28
CP08	36.485	206.584	243.069	3,93	1,86

Os resultados demonstrados no Gráfico 15 referem-se aos corpos de prova selecionados para prática de fundição, plotados em ordem crescente dos resultados de VOF – Total [-], valores estes obtidos na etapa 01 (um) do processo de simulação numérica.

Gráfico 15 - Análise gráfica – Resultados selecionados para prática de fundição – Etp. 01



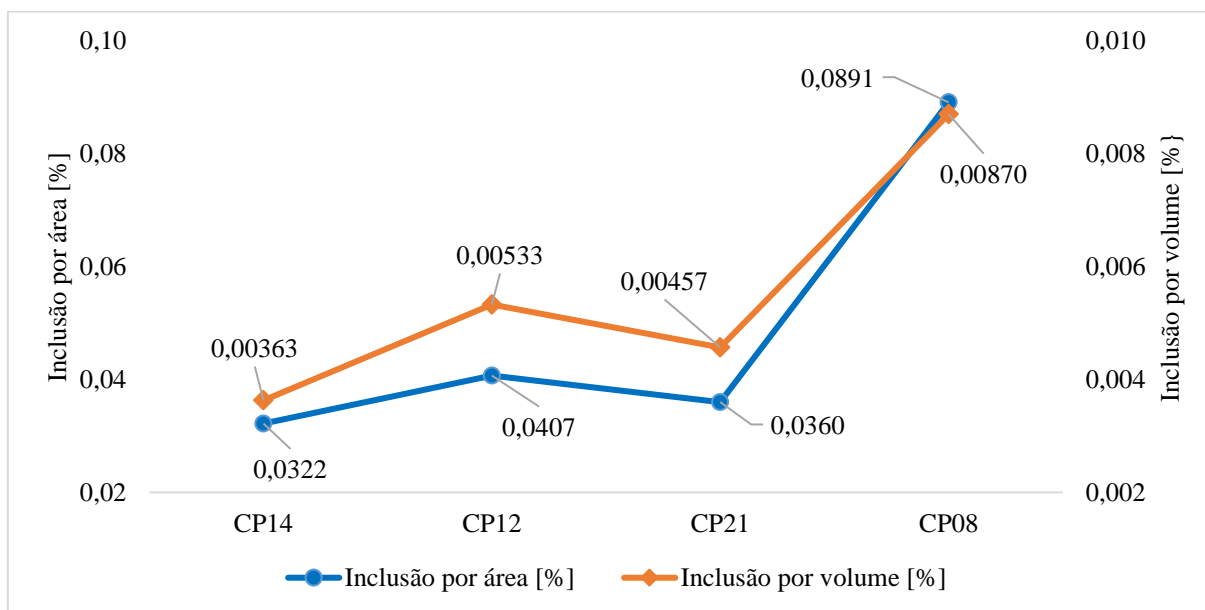
Analisando o Gráfico 15 foi observado uma redução percentual de 72%, 62% e 52% respectivamente para o CP14, CP12 e CP21 em comparação ao CP08 para o resultado somatório de superfície de metal exposta ao ar [-].

Para o resultado de aprisionamento de ar [%] foi observado uma redução percentual de 72%, 35% e 44% respectivamente para os corpos de prova CP14, CP12 e CP21 em comparação ao CP08.

Para o resultado de velocidade [m/s] foi observado uma redução percentual de 40%, 25% e 28% respectivamente para os corpos de prova CP14, CP12 e CP21 em comparação ao CP08.

Os resultados demonstrados no Gráfico 16 referem-se aos corpos de prova selecionados para prática de fundição, valores estes obtidos na etapa 02 (dois) de simulações.

Gráfico 16 - Análise gráfica – Resultados selecionados para prática de fundição – Etp. 02



Analisando o Gráfico 16 foi observado uma redução percentual de 64%, 54% e 60% respectivamente para os corpos de prova CP14, CP12 e CP21 em comparação ao CP08 para o resultado de inclusão por área [%].

Para o resultado de inclusão por volume [%] foi observado uma redução percentual de 58%, 39% e 47% respectivamente para os corpos de prova CP14, CP12 e CP21 em comparação ao CP08.

Analisando o Gráfico 16 foi possível observar a que os resultados de inclusão por área [%] e inclusão por volume [%] do CP12 e CP21 apresentaram a mesma característica de inversão decrescente dos resultados de aprisionamento de ar [%] e velocidade [m/s] do Gráfico 15.

4.6 ANÁLISE VISUAL DA SUPERFÍCIE

As indicações superficiais observadas foram circuladas para melhor visualização da disposição das mesmas nas faces avaliadas. A Figura 108a demonstra as indicações observadas na face de avaliação frontal e a Figura 108b as indicações da face traseira para o corpo de prova 14 – CP14.

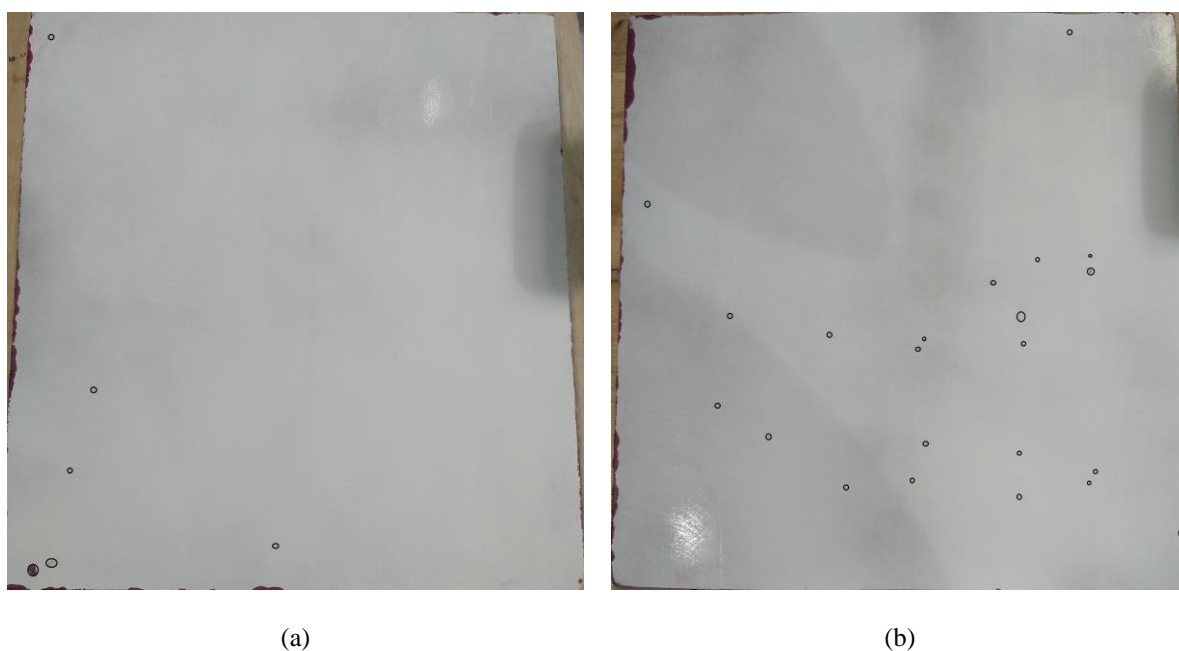


Figura 108 – Indicações superficiais do CP14 (a) face frontal e (b) face traseira

O CP14 apresentou o menor número de indicações entre os corpos de prova selecionados para prática de fundição, principalmente para face de avaliação frontal. A quantidade baixa de indicações observadas e suas localizações concentradas na parte inferior das faces avaliadas mostrou similaridade aos resultados obtidos por simulação numérica demonstrados na Figura 95. O número de indicações anotadas para o CP14 na face frontal foi de 06 (seis) e para a face traseira de 22 (vinte e duas), totalizando 28 (vinte e oito) indicações.

A Figura 109a demonstra as indicações observadas na face de avaliação frontal e a Figura 109b as indicações da traseira para o CP12.

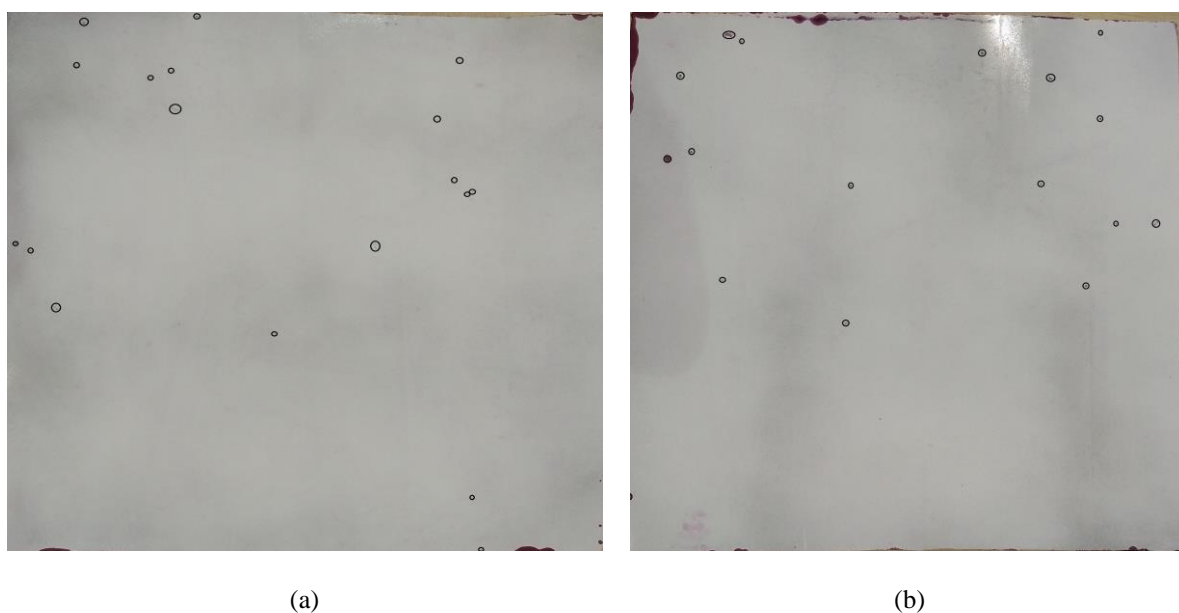


Figura 109 – Indicações superficiais do CP12 (a) face frontal e (b) face traseira

O CP12 apresentou inclusões dispersas, com quantidade similar aos resultados obtidos por simulação, porém com baixa similaridade com relação aos posicionamentos conforme demonstrados na Figura 93 para as duas faces analisadas. O número de indicações anotadas para o CP12 na face frontal foi de 18 (dezoito) e para face traseira 16 (dezesesseis), totalizando 34 (trinta e quatro) indicações.

A Figura 110a demonstra as indicações observadas na face de avaliação frontal e a Figura 110b as indicações da face traseira para o CP21.

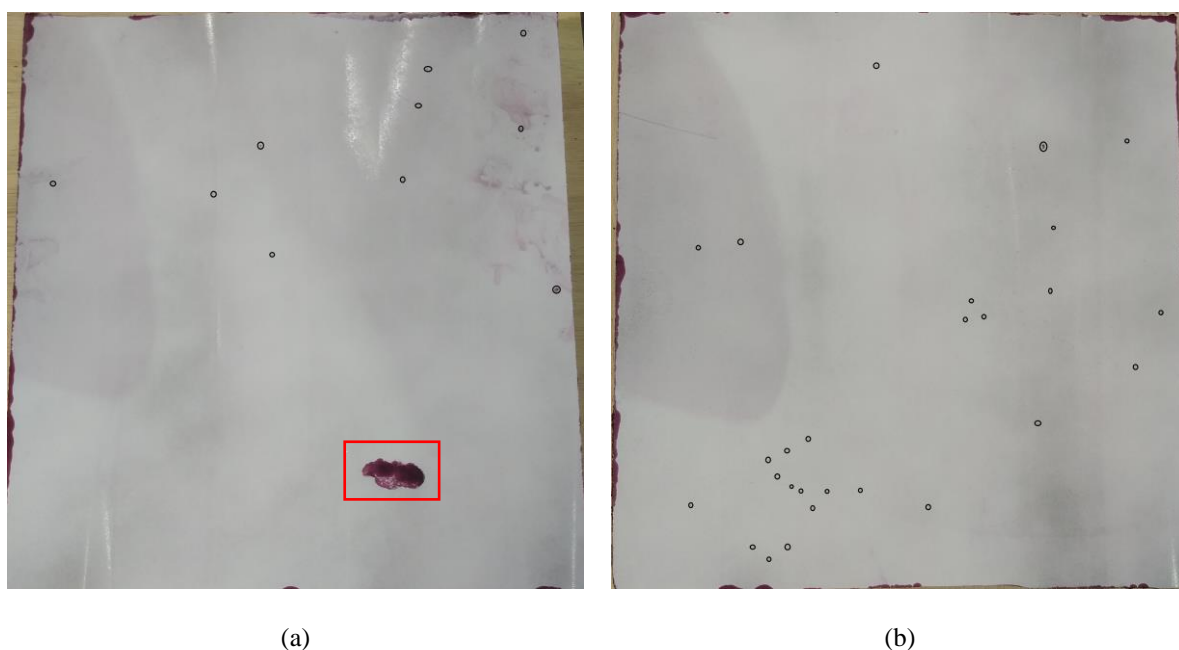


Figura 110 – Indicações superficiais do CP21 (a) face frontal e (b) face traseira

A região destacada em vermelho indicada na Figura 110a deve ser desconsiderada, já que a mesma foi provocada acidentalmente na realização do corte do massalote de alimentação.

O CP21 apresentou similaridade com os resultados obtidos por simulação numérica demonstrados na Figura 106 para as duas faces analisadas, em quantidade e disposição das indicações na face. O número de indicações anotadas para o CP21 na face frontal foi de 10 (dez) e para a face traseira de 27 (vinte e sete), totalizando 37 (trinta e sete) indicações.

A Figura 111a demonstra as indicações observadas na face de avaliação frontal e a Figura 111b as indicações da face traseira para o CP08.

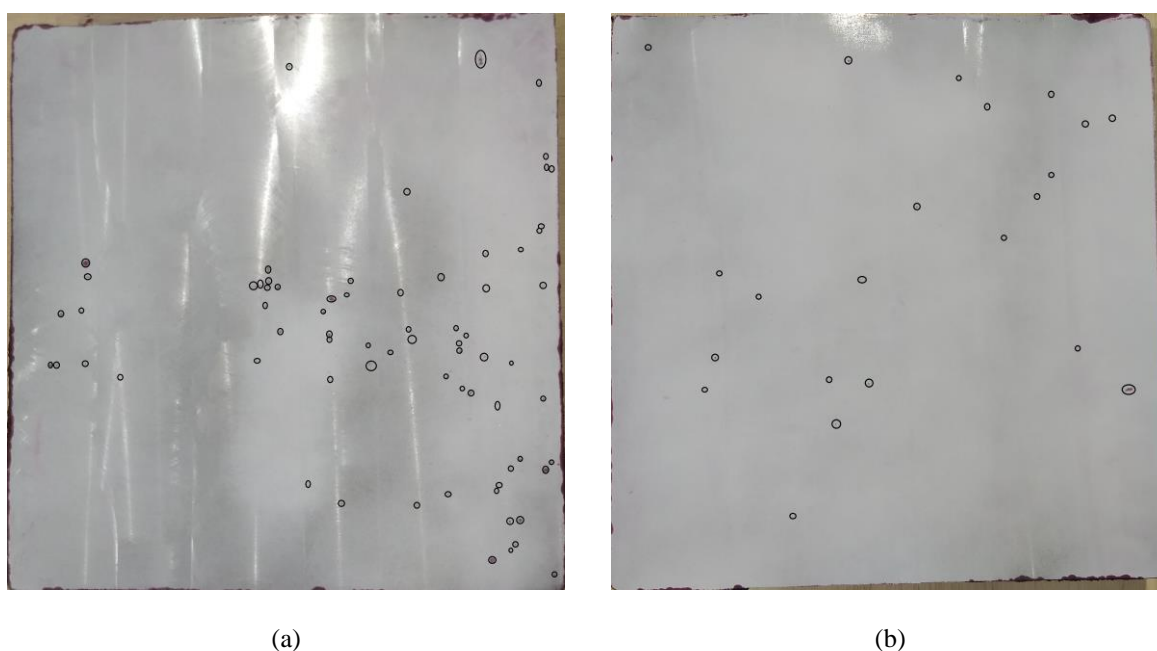
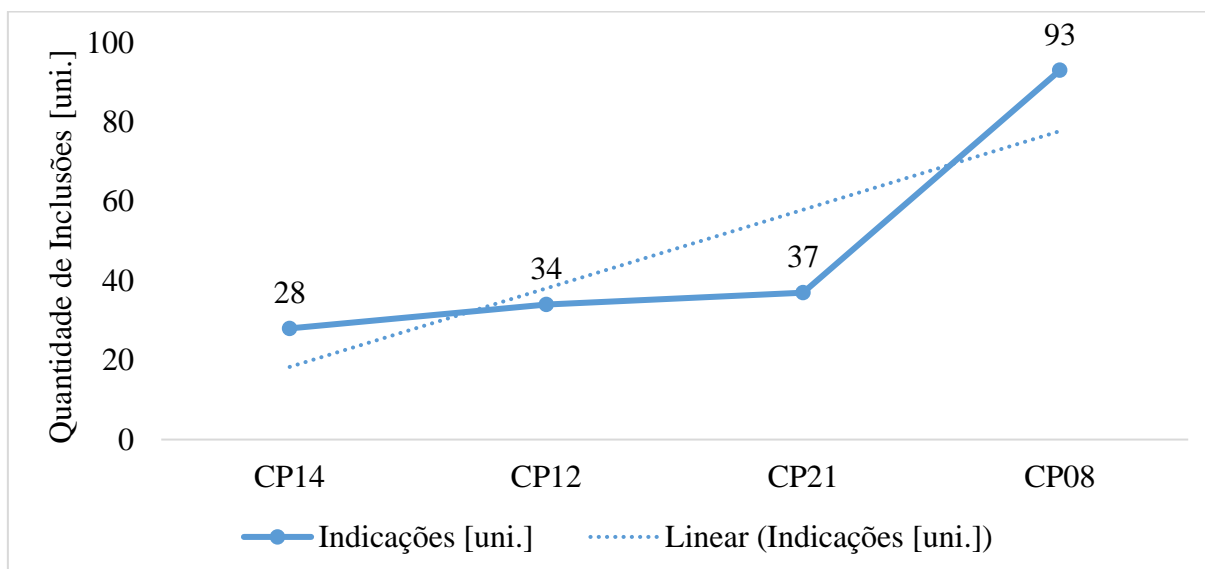


Figura 111 – Indicações superficiais do CP08 (a) face frontal e (b) face traseira

O CP08 foi aquele que apresentou o maior número de indicações, principalmente para face de frontal. O maior número de indicações se concentrou na parte direita do corpo de prova com relação a face de avaliação 01, com similaridade aos resultados obtidos por simulação numérica demonstrados na Figura 87. O número de indicações anotadas para o CP08 face frontal foi de 71 (setenta e uma) e para a face traseira foi de 22 (vinte e duas), totalizando 93 (noventa e três) indicações.

O somatório da quantidade de indicações observadas nas faces dos corpos de prova foi plotado em função do corpo de prova definido para prática de fundição e demonstradas no Gráfico 17.

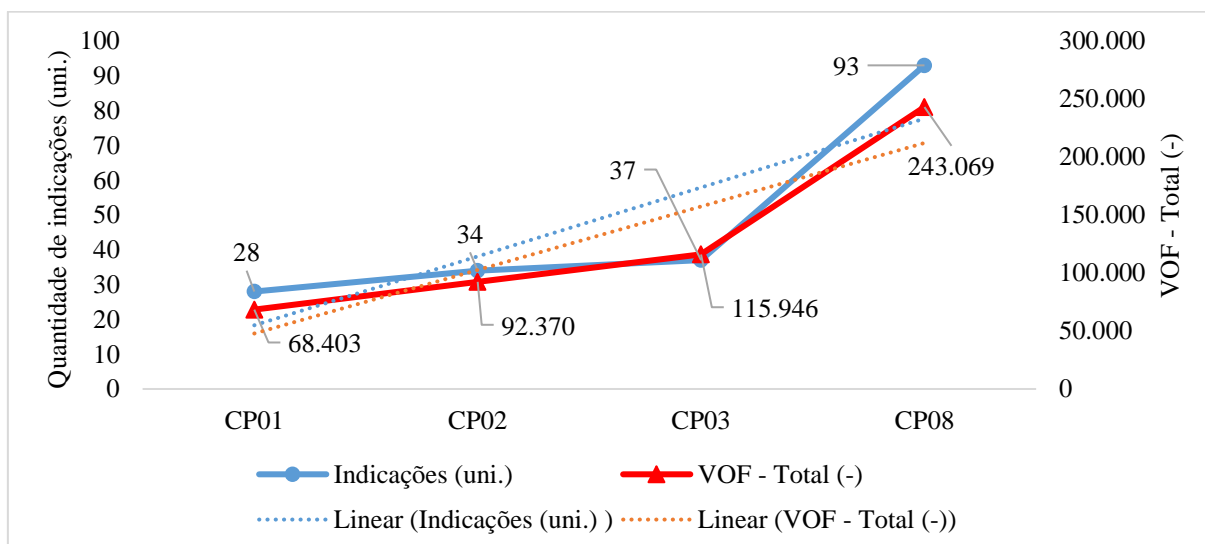
Gráfico 17 – Quantidade de indicações por corpo de prova



Analisando o Gráfico 17 foi observado uma redução percentual de 60%, 63% e 70% respectivamente para o CP14, CP12 e CP21 em comparação ao CP08 para o número de indicações observadas nas faces dos corpos de prova selecionados para prática de fundição. Estes resultados devem ser analisados de forma comparativa aos resultados demonstrados no Gráfico 15 e Gráfico 16.

O quantitativo de indicações observado nas faces dos corpos de prova foi plotado também em combinação com os resultados objetivados na simulação numérica para avaliação comparativa entre simulação e prática de fundição. O Gráfico 18 demonstra a quantidade de indicações [uni.] pelo resultado de VOF – Total [-] para os corpos de prova selecionados para prática de fundição (CP14, CP12, CP21 e CP08).

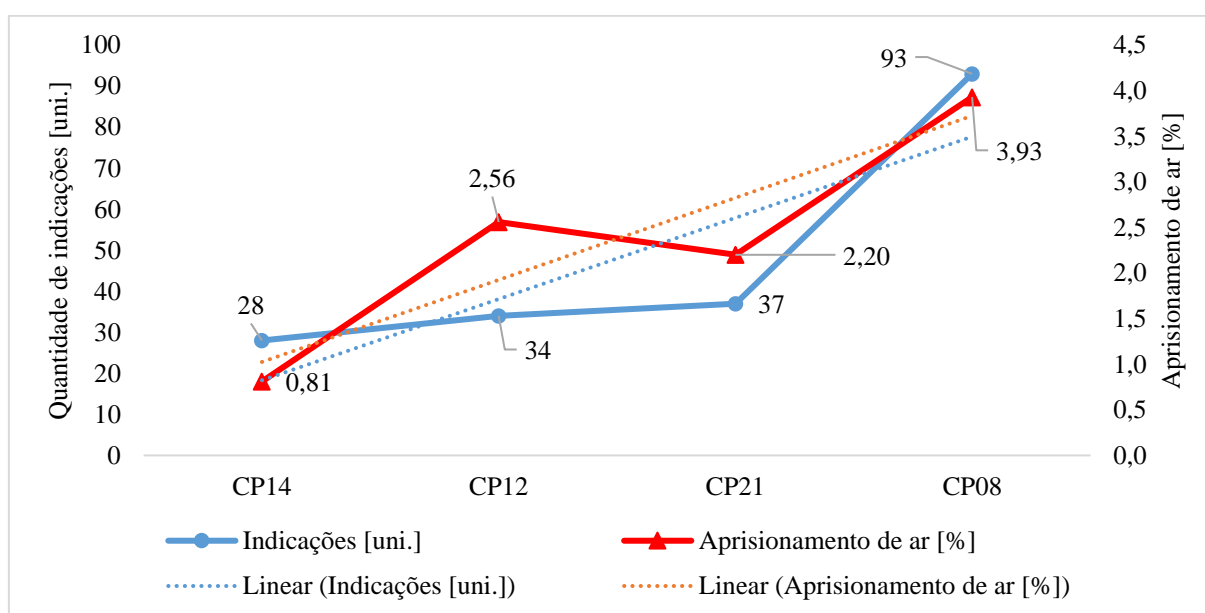
Gráfico 18 – Quantidade de indicações pelo VOF – Total [-]



Analisando o Gráfico 18 foi possível observar que a curva para a quantidade de indicações [uni.] possui característica bastante similar aos resultados obtidos pelo VOF – Total [-] e as linhas de tendência apresentaram caracteriza similar para ambos resultados obtidos.

O Gráfico 19 demonstra a quantidade de indicações [uni.] pelo aprisionamento de ar [%] para os corpos de prova selecionados para prática de fundição (CP14, CP12, CP21 e CP08).

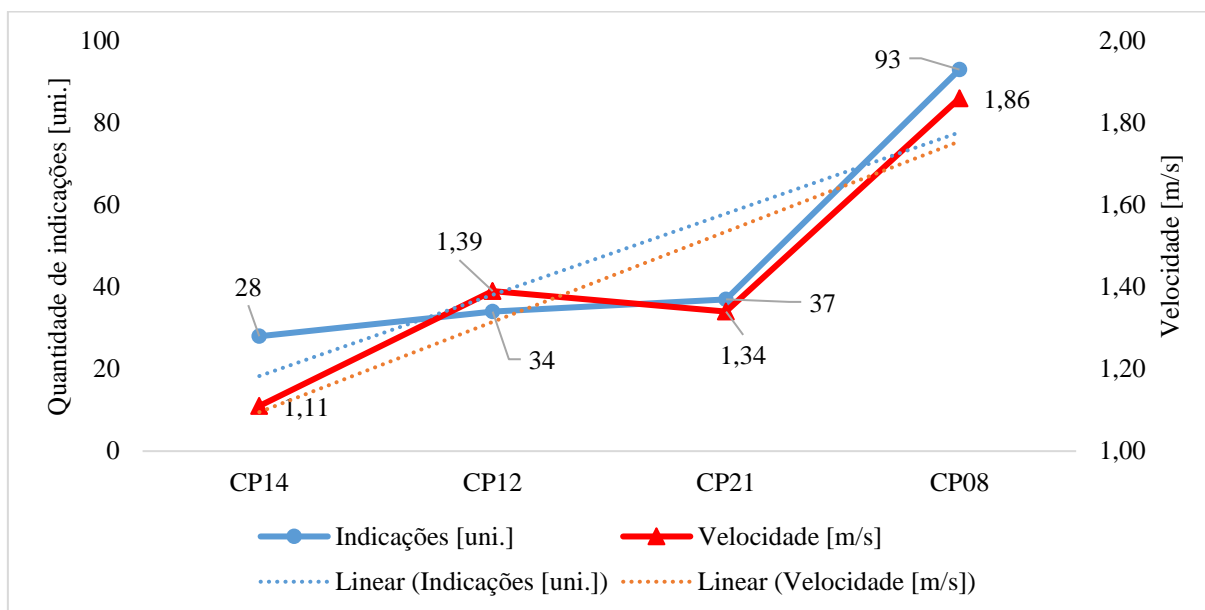
Gráfico 19 – Quantidade de indicações pelo Aprisionamento de ar [%]



Analisando o Gráfico 19 foi possível observar um ponto discrepante para o CP12, o qual apresentou resultado de aprisionamento [%] superior ao CP21, inversão essa não observada para a quantidade de indicações anotadas. Os demais resultados apresentaram similaridade com os resultados obtidos por simulação numérica, assim como para as linhas de tendência.

O Gráfico 20 demonstra a quantidade de indicações pela velocidade [m/s] para os corpos de prova selecionados para prática de fundição (CP14, CP12, CP21 e CP08).

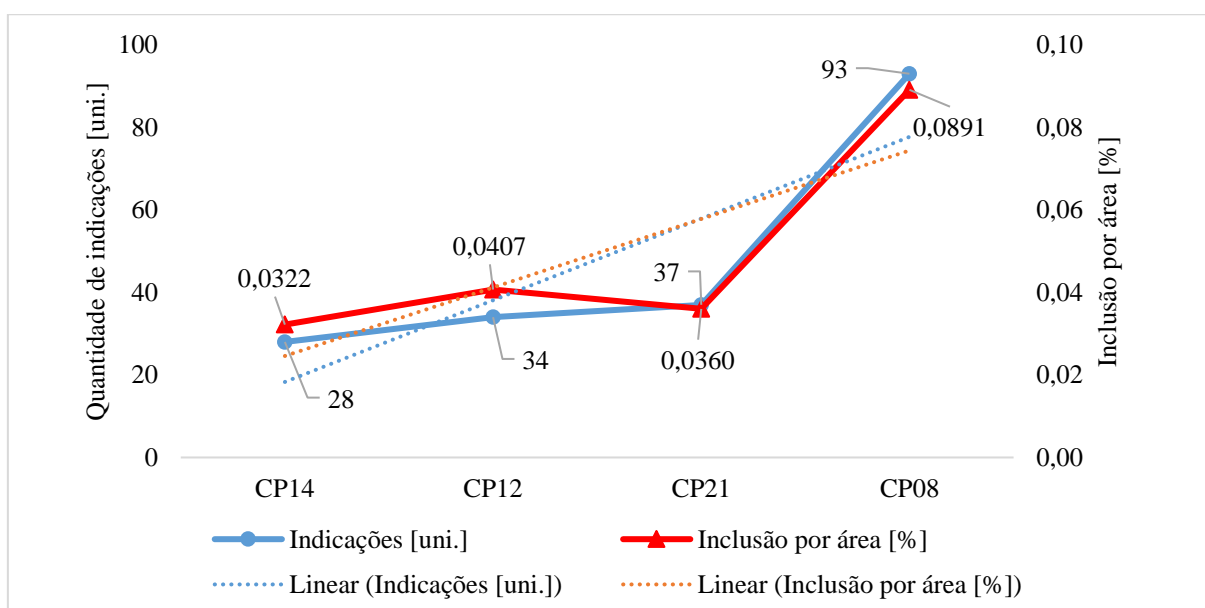
Gráfico 20 - Quantidade de indicações pela Velocidade [m/s]



Igualmente ao resultado obtido analisando o Gráfico 19 foi observado no Gráfico 20 um ponto discrepante para o CP12, o qual apresenta resultado de velocidade [m/s] superior ao CP21, inversão essa não observada para a quantidade de indicações anotadas. Os demais resultados apresentaram similaridade com os resultados obtidos por simulação numérica, assim como para as linhas de tendência.

O Gráfico 21 demonstra a quantidade de indicações pelo resultado de inclusão por área [%] para os corpos de prova selecionados para prática de fundição (CP14, CP12, CP21 e CP08).

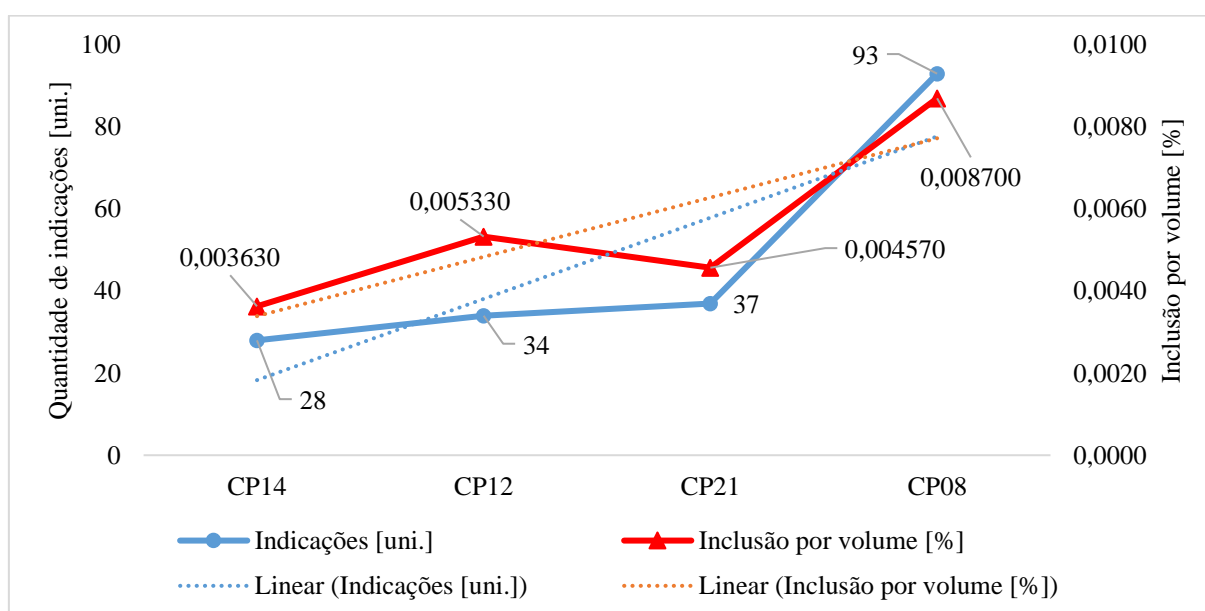
Gráfico 21 – Quantidade de indicações pela inclusão por área [%]



Analisando o Gráfico 21 foi possível observar um ponto discrepante para o CP12, o qual apresentou resultado de inclusão por área [%] superior ao CP21, inversão essa não observada para a quantidade de indicações anotadas. O resultado de inclusão por área [%] apresentou similaridade para todos os corpos de prova, mesmo com a inversão dos resultados entre simulação e prática entre o CP12 e CP21, é observado baixa variação percentual entre os mesmos, linhas de tendência possuem diferença de inclinação fazendo com que as mesmas se cruzem em um determinado ponto gráfico, mas com mesma característica crescente do CP14 até o CP08.

O Gráfico 22 demonstra a quantidade de indicações de inclusão por volume [%] para os corpos de prova selecionados para prática de fundição (CP14, CP12, CP21 e CP08).

Gráfico 22 – Quantidade de indicações pela inclusão por volume [%]



Da mesma forma analisando o Gráfico 22 foi possível observar um ponto discrepante para o CP12, o qual apresentou resultado de inclusão por volume [%] superior ao CP21, inversão essa não observada para a quantidade de indicações anotadas. O resultado de inclusão por volume [%] apresentou a maior diferença entre as linhas de tendência geradas para os resultados comparados com o número de indicações anotadas.

De forma geral todos os resultados de VOF – Total [-], aprisionamento de ar [%], velocidade [m/s], inclusões por área [%] e inclusões por volume [%] se comparados com o número unitário de indicações superficiais anotadas apresentaram similaridade com os resultados obtidos entre simulação e prática de fundição.

4.7 ANÁLISE POR MICROSCÓPIO DIGITAL

O detalhamento das características das inclusões foi realizado por microscópio digital e demonstrados na Figura 112. A Figura 112a demonstra uma inclusão com característica arredondada, a Figura 112b demonstra inclusões aglomeradas, concentradas em um ponto de avaliação, a Figura 112c e Figura 112d apresentam características similares a Figura 112a, com variação do tamanho.

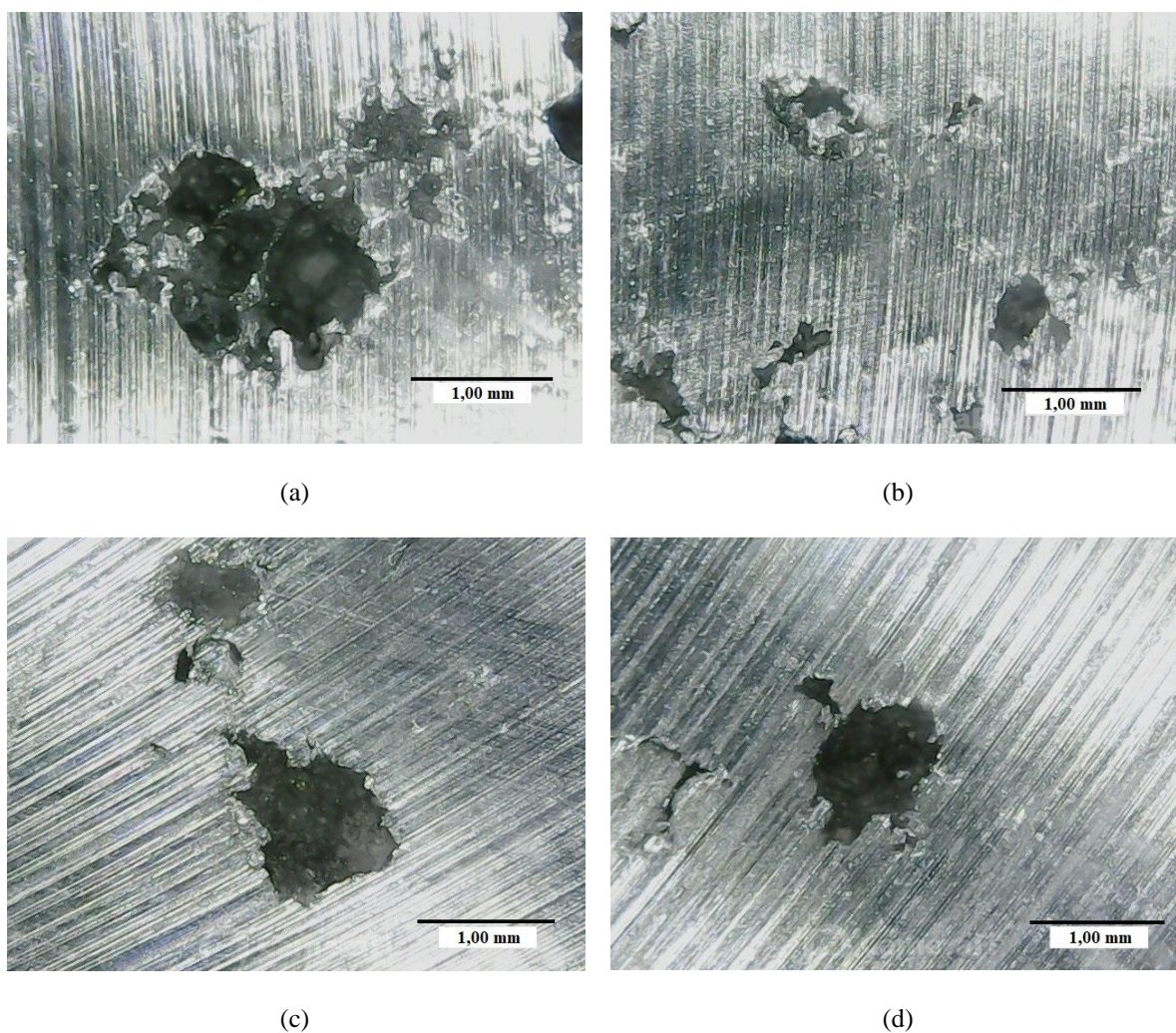


Figura 112 – Análise de inclusões

As inclusões apresentaram as mesmas características, de forma arredondada com tamanhos variando de 0,05 até 5,00 milímetros, sendo a grande maioria das mesmas com tamanho de até 1,00 milímetro, com pico em inclusões de 0,2 a 0,5 milímetros. As inclusões de maior tamanho foram encontradas na superfície superior do corpo de prova, ao lado do massalote de alimentação, com similaridade aos resultados por simulação numérica. Essas

características apresentam similaridade aos resultados obtidos no estudo de Carlson e Beckermann [19].

Uma inclusão de maior tamanho foi demonstrada na Figura 113 a fim de melhor visualizar as características da mesma abaixo da superfície usinada.

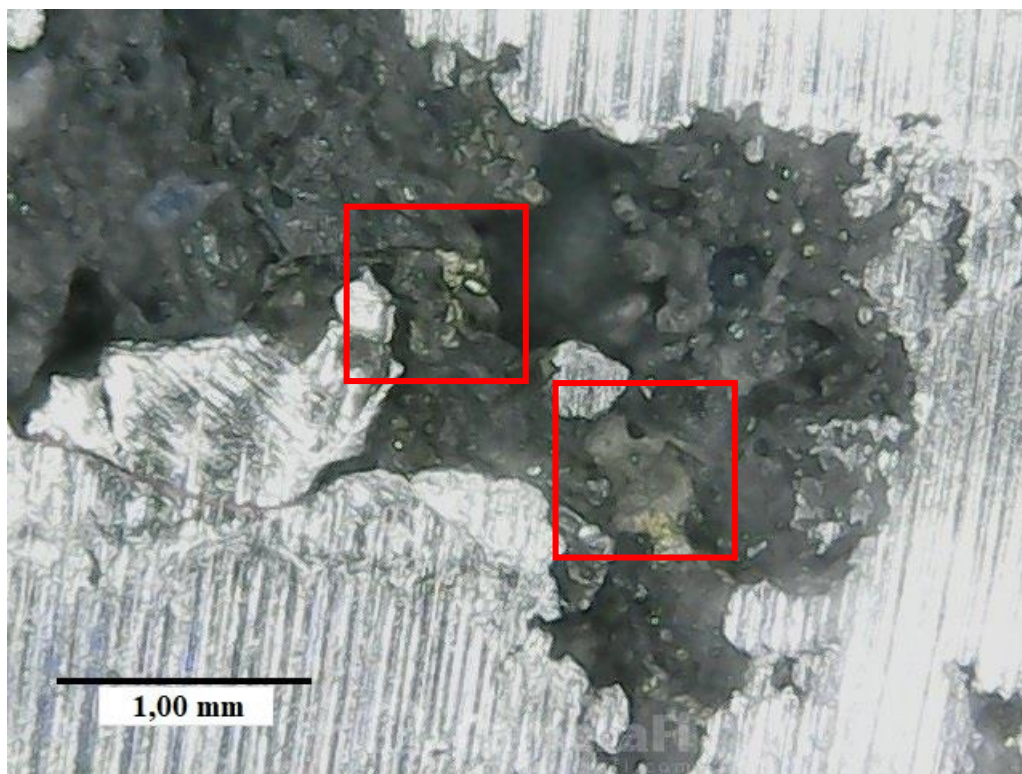


Figura 113 – Detalhe da inclusão por microscópio digital

Foi possível observar que as inclusões apresentam alguns pontos abaixo da superfície com coloração clara se comparado ao restante da mesma. Isso significa que estas apresentam contaminação por algum reagente, como por exemplo matérias desoxidantes que reagem com o ar para formação de inclusões de reoxidação ou materias com quem o metal líquido entrou em contato.

A Figura 114 demonstra uma inclusão com característica arredondada em que a mesma possui ligação direta com uma fissura em linha. Esse tipo de inclusão foi visualizado em cerca de 5% das inclusões avaliadas.

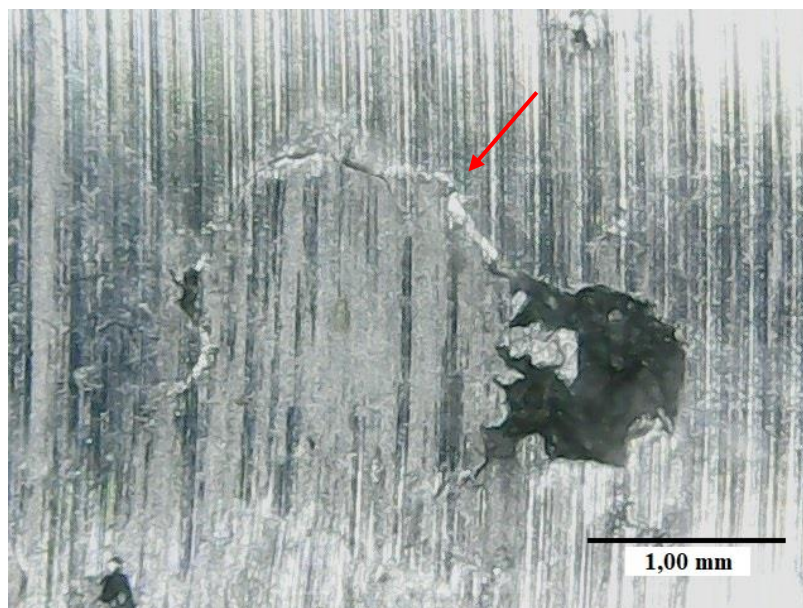


Figura 114 – Detalhe de inclusão arredondada com ligação direta a uma fissura linha

Foi possível observar em algumas inclusões avaliadas que as mesmas possuem fissuras em sua periferia, como demonstrado na Figura 114 que parecem ter origem na inclusão, a seta indicada na imagem demonstra a fissura com ligação direta na inclusão. Conforme mencionado no referencial bibliográfico deste estudo, tais caracterizas podem ser danosas as propriedades mecânicas do componente fundido.

4.8 ANÁLISE QUÍMICA

A Tabela 6 demonstra as faixas máximas e mínimas para composição química do aço carbono baixa liga de alta resistência DIN G42CrMo4 (1.7231), definido para prática de fundição, assim como a média final obtida por espectrometria de emissão ótica das amostras analisadas.

Tabela 6 - Composição química G42CrMo4 (1.7231)

G42CrMo4 (1.7231)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Máx	0,380	-	0,600	-	-	0,800	0,150
Mín	0,480	0,600	1,000	0,025	0,020	1,200	0,300
Real	0,404	0,562	0,951	-	-	0,817	0,232

Conforme avaliado os corpos de prova foram fundidos dentro da composição química especificada pela norma DIN G42CrMo4 (1.7231), pré-estabelecida para prática de fundição.

4.9 ENSAIO METALGRÁFICO

Os resultados das análises metalográficas realizadas, em ordem sequencial dos corpos de prova CP14, CP12, CP21 e CP08, com ampliação de 12x foram demonstrados na Figura 115.

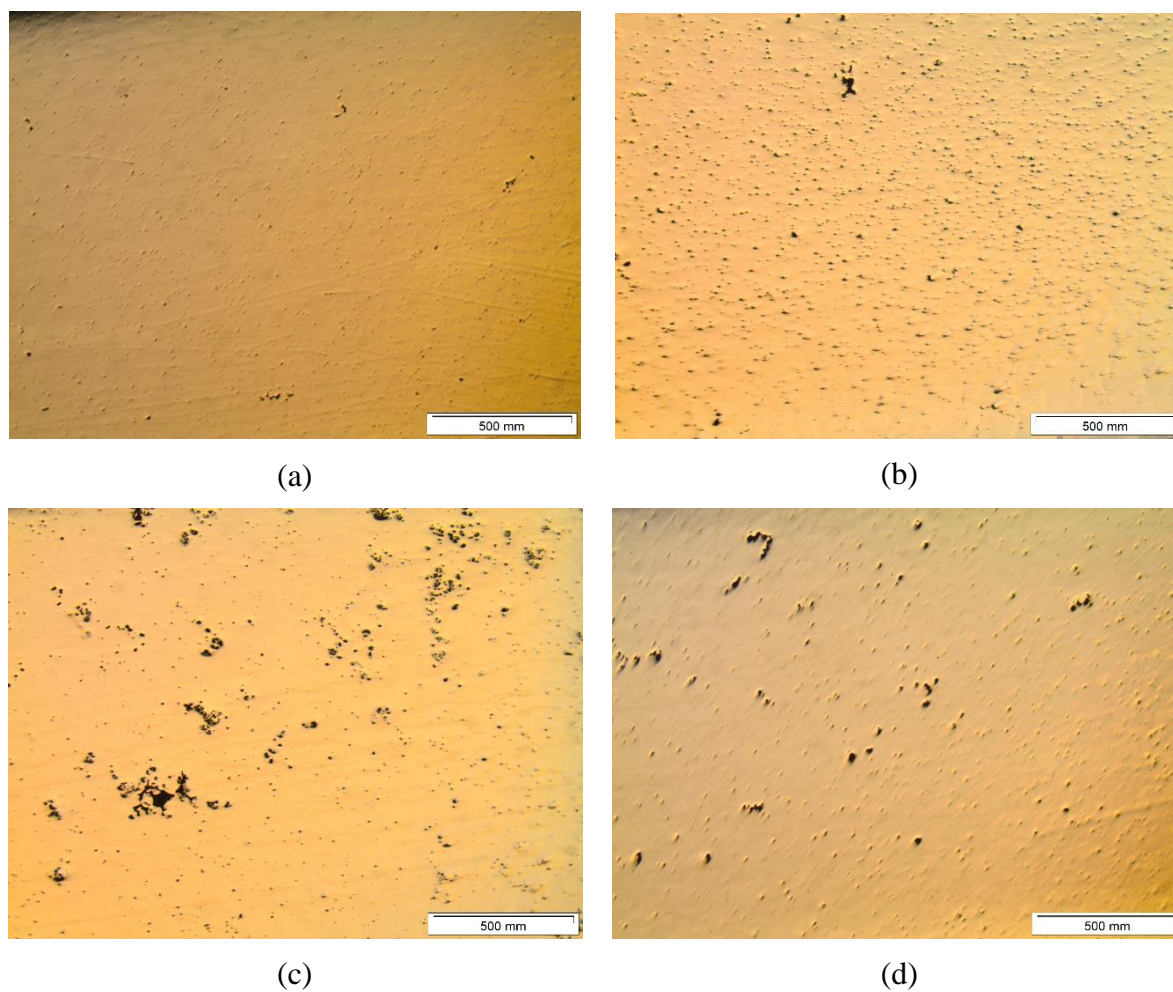


Figura 115 – Metalografias com ampliação de 12x (a) CP14, (b) CP12, (c) CP21 e (d) CP08.

Os resultados das análises metalográficas realizadas, em ordem sequencial dos corpos de prova CP14, CP12, CP21 e CP08, com ampliação de 50x foram demonstradas na Figura 116.

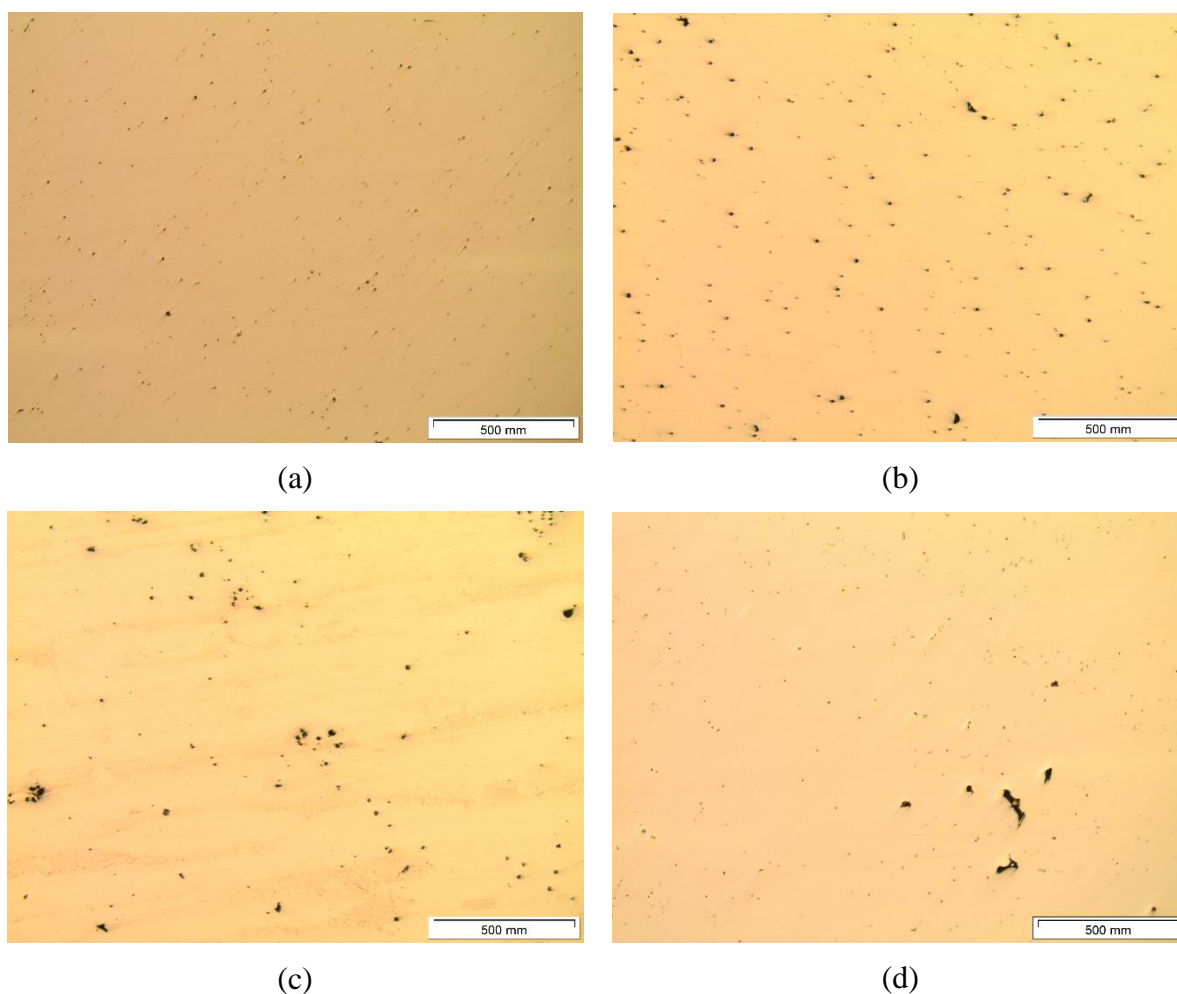


Figura 116 - Metalografias com ampliação de 50x (a) CP14, (b) CP12, (c) CP21 e (d) CP08.

Analisando os resultados obtidos pela análise de inclusões com ampliação de 12x e 50x foi possível observar tendência crescente da contaminação da matriz metálica, assim como também sua tendência de aglomeração, visualizadas principalmente para os corpos de prova CP21 e CP08.

Os resultados das análises metalográficas realizadas, em ordem sequencial dos corpos de prova CP14, CP12, CP21 e CP08, com ampliação de 100x foram demonstradas na Figura 117.

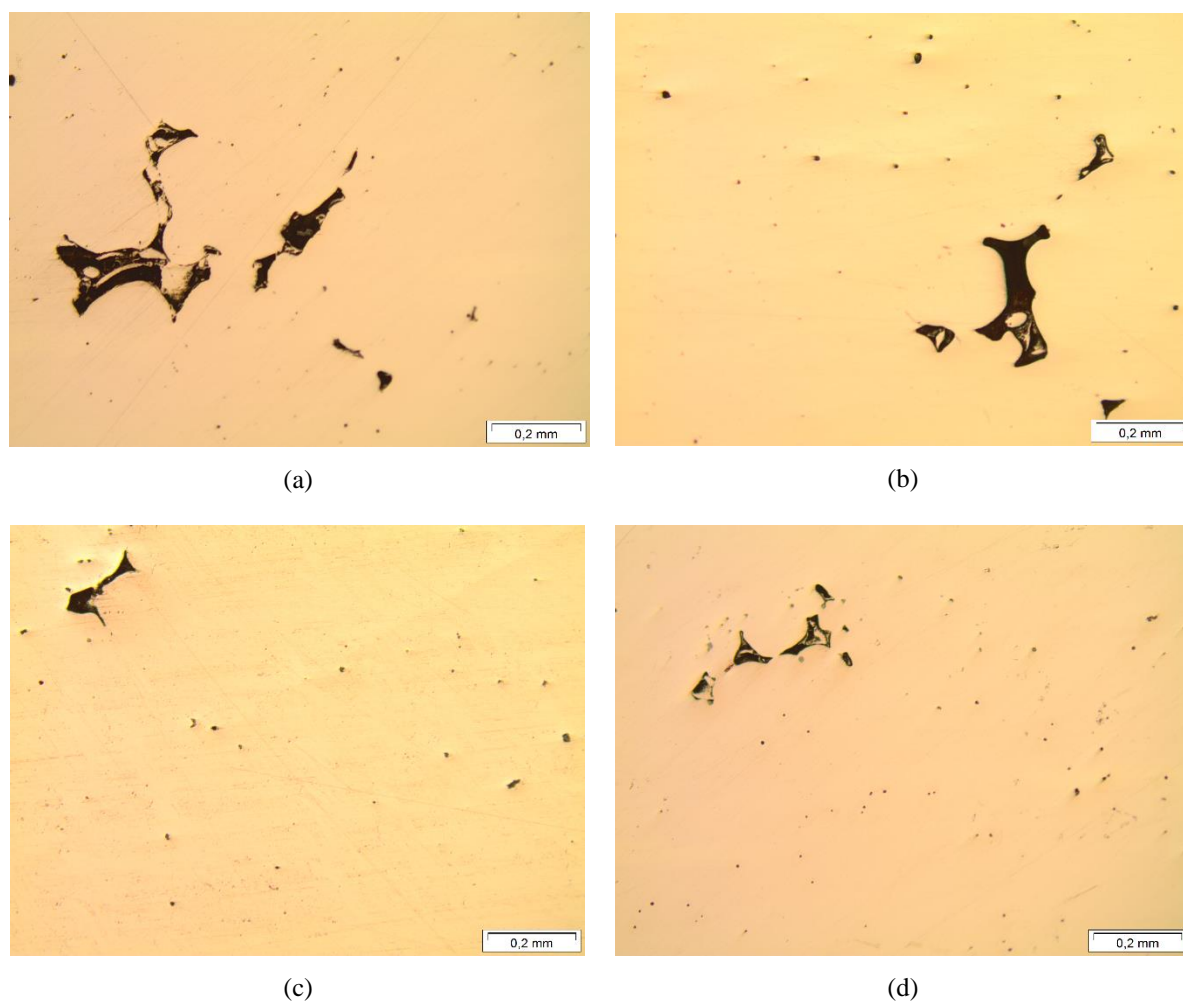


Figura 117 - Metalografias com ampliação de 50x (a) CP14, (b) CP12, (c) CP21 e (d) CP08.

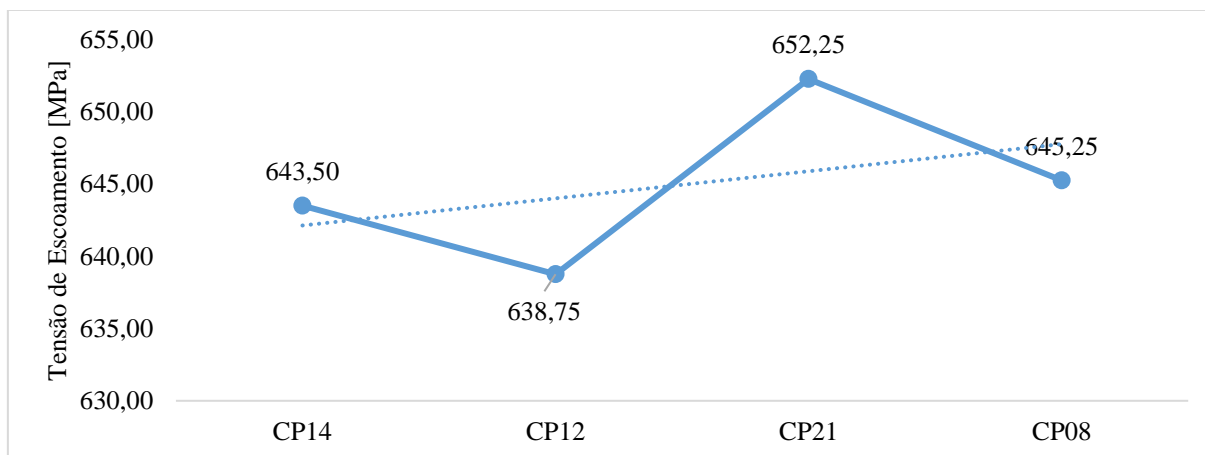
Analisando os resultados com ampliação superior (100x) foi possível observar microporosidades com características semelhantes, tal ampliação inviabiliza a comparação entre elas em relação a contaminação da matriz, já que foram analisados pontos específicos, que por sua vez podem não representar a média. A característica destas levam a percepção de microrechupes, que não foram encontrados em elevada quantidade na matriz metálica.

4.10 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os resultados do ensaio de tração foram disponibilizados individualmente como a média para melhor correlação entre os corpos de prova avaliados em prática de fundição (CPs 14, 21, 12 e 08), desta forma para cada corpo de prova foram realizados 04 (quatro) ensaios por tipo de Amostra (01 ou 02). O ensaio de tração realizado traz como resultados a Tensão de escoamento [MPa], Limite de Resistência [MPa], Alongamento (%) e Estrição [MPa].

O Gráfico 23 demonstra os resultados de Tensão de Escoamento [MPa] para os corpos de prova CP14, CP12, CP21 e CP08 nas dimensões da Amostra 02.

Gráfico 23 - Análise da Tensão de Escoamento [MPa] – Amostra 02

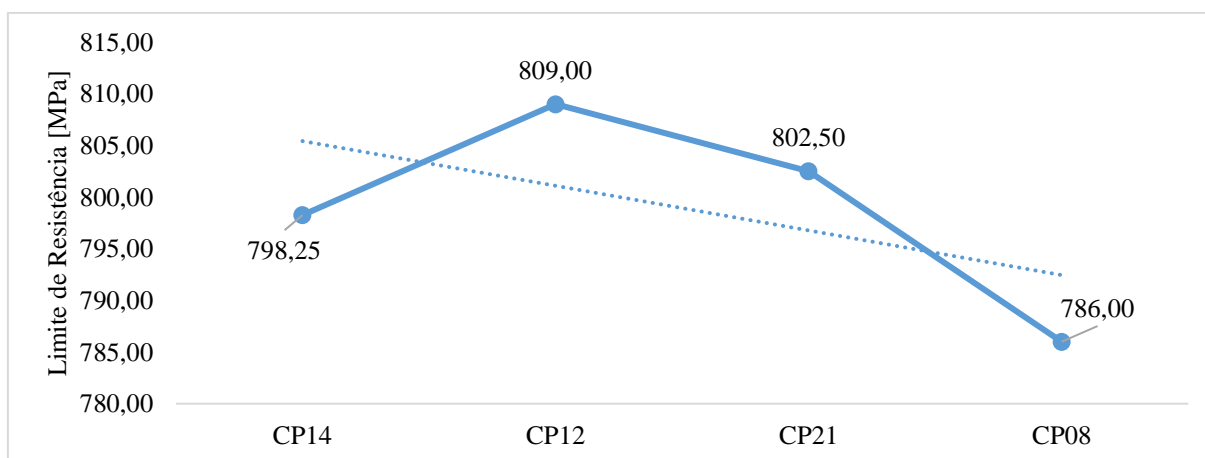


O melhor resultado obtido para a Tensão de Escoamento foi para o CP21 (652,25 MPa). Analisando o Gráfico 23 foi observado uma redução percentual de 1,34%, 2,07% e 1,07% respectivamente para o CP14, CP12 e CP08 em comparação ao CP21 para a Tensão de Escoamento [MPa].

Não foi observado tendência decrescente entre a disponibilização dos CPs o que vincularia os resultados obtidos para essa grandeza com o número de inclusões observadas no processo de SNPFM e por prática de fundição.

O Gráfico 24 demonstra os resultados de Limite de Resistência [MPa] para os corpos de prova CP14, CP12, CP21 e CP08 nas dimensões da Amostra 02.

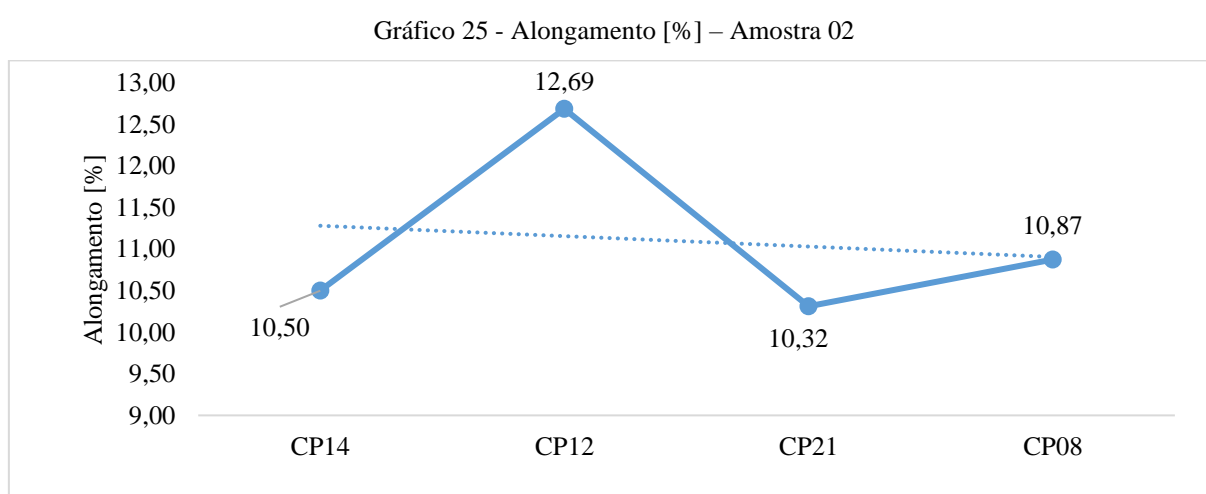
Gráfico 24 - Limite de Resistência [MPa] – Amostra 02



O melhor resultado obtido para o Limite de Resistência foi para o CP12 (809,00 MPa). Analisando o Gráfico 24 foi observado uma redução percentual de 1,32%, 0,80% e 2,84% respectivamente para os corpos de prova CP14, CP21 e CP08 em comparação ao CP12 para Limite de Resistência [MPa].

Foi observado tendência decrescente para o resultado de Limite de Resistência [MPa] entre os corpos de prova analisados, apesar do melhor resultado não ter sido apresentado para o CP14 e da baixa variação percentual entre os mesmos.

O Gráfico 25 demonstra os resultados de Alongamento [%] para os corpos de prova CP14, CP12, CP21 e CP08 nas dimensões da Amostra 02.

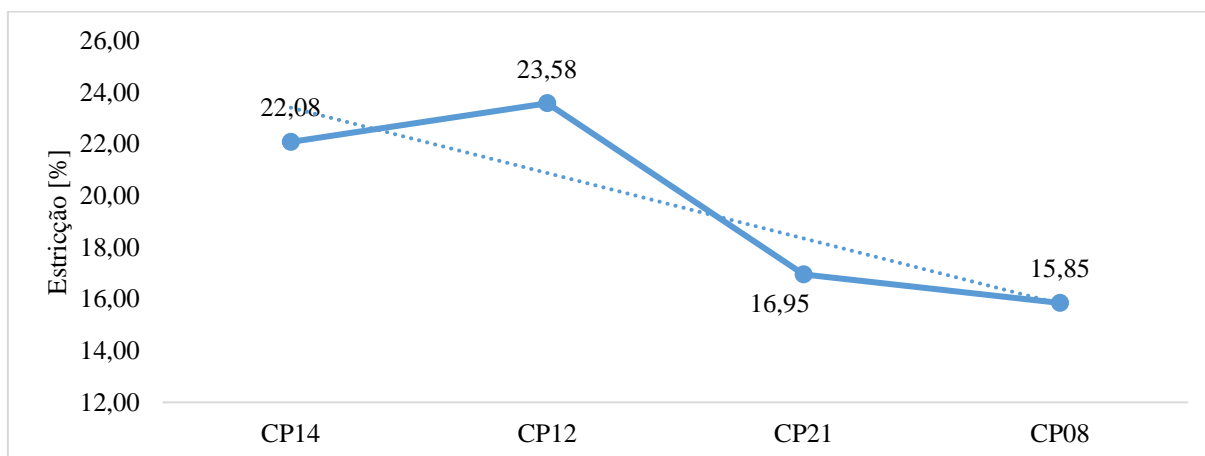


O melhor resultado obtido para o Alongamento foi para o CP12 (12,69%). Analisando o Gráfico 25 foi observado uma redução percentual de 17,25%, 18,68% e 14,34% respectivamente para os corpos de prova CP14, CP21 e CP08 em comparação ao CP12 para o Alongamento [%].

Foi observado tendência decrescente entre a disponibilização dos CPs, porém com baixa amplitude, devido a variação de altos e baixos dos resultados obtidos. Para o resultado de Alongamento foram observadas diferenças percentuais entre o melhor resultado (CP12) e o pior resultado (CP08).

O Gráfico 26 demonstra os resultados de Estricção [%] para os corpos de prova CP14, CP12, CP21 e CP08 nas dimensões da Amostra 02.

Gráfico 26 - Estricção [%] – Amostra 02



O melhor resultado obtido para Estricção foi para o CP12 (23,58%). Analisando o Gráfico 26 foi observado uma redução percentual de 6,36%, 23,58% e 32,78% respectivamente para os corpos de prova CP14, CP21 e CP08 em comparação ao CP12 para a Estricção [%].

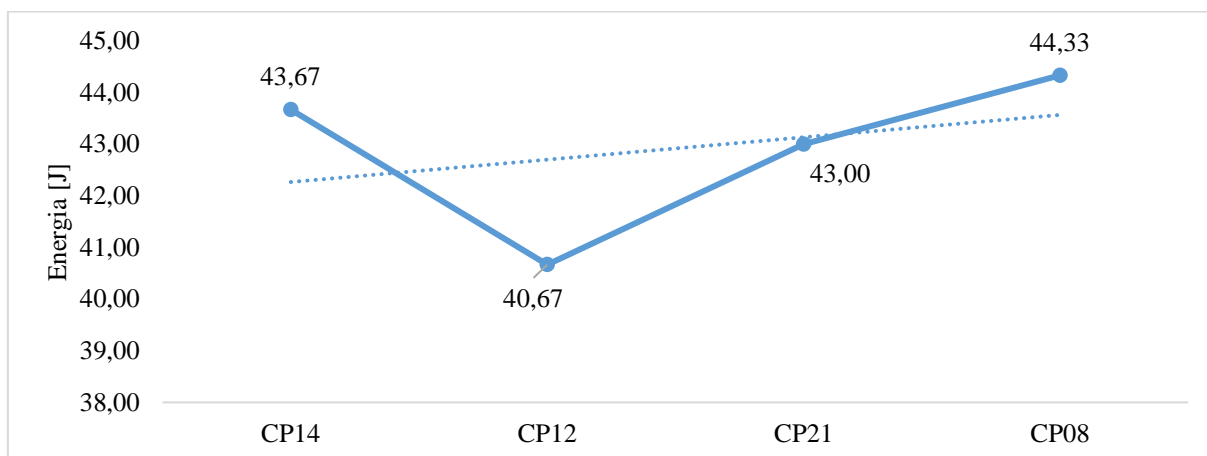
Os resultados obtidos para a Estricção se mostraram similares aos resultados obtidos para o Limite de Resistência, da mesma forma apresentaram tendência decrescente, apesar do melhor resultado não ter sido obtido para o CP14. Porém a diferença percentual obtida entre os mesmos é superior, a Estricção se mostrou como resultado com maior variação percentual entre os avaliados pelo ensaio de tração.

4.11 ENSAIO DE IMPACTO (CHARPY)

Os resultados obtidos foram disponibilizados como a média obtida para cada corpo de prova avaliados (CPs 14, 12, 21 e 08), desta forma para cada corpo de prova foram realizados 08 (oito) ensaios. O ensaio de impacto (charpy) realizado traz como resultados o valor da Energia [J].

O Gráfico 27 demonstra os resultados de Tensão de Escoamento [MPa] para os corpos de prova CP14, CP12, CP21 e CP08 nas dimensões da Amostra 02.

Gráfico 27 - Energia [J] – Ensaio de Impacto (Charpy)



O melhor resultado obtido para o ensaio de impacto foi para o CP08 (44,33J). Analisando o Gráfico 27 foi observado uma redução percentual de 1,49%, 8,26% e 3,00% respectivamente para os corpos de prova CP14, CP12 e CP21 em comparação ao CP08 para a Energia [J].

Os resultados obtidos no ensaio de impacto para Energia [J] mostraram tendência crescente, oposto aos resultados esperados se correlacionados com os resultados obtidos por simulação numérica, o melhor resultado obtido foi para o CP08, bastante similar ao CP14, com baixa variação percentual, a maior variação percentual foi obtida para o CP12, com redução superior a 8,00%.

4.12 ANÁLISE DE FRATURA (MEV)

A Figura 98 referiu-se ao CP14 na região da fratura de um dos corpos de prova do ensaio de impacto (charpy), onde foi observada uma inclusão em formato circular conforme destacado na imagem. O mapeamento de oxigênio foi realizado para compreensão da do defeito.

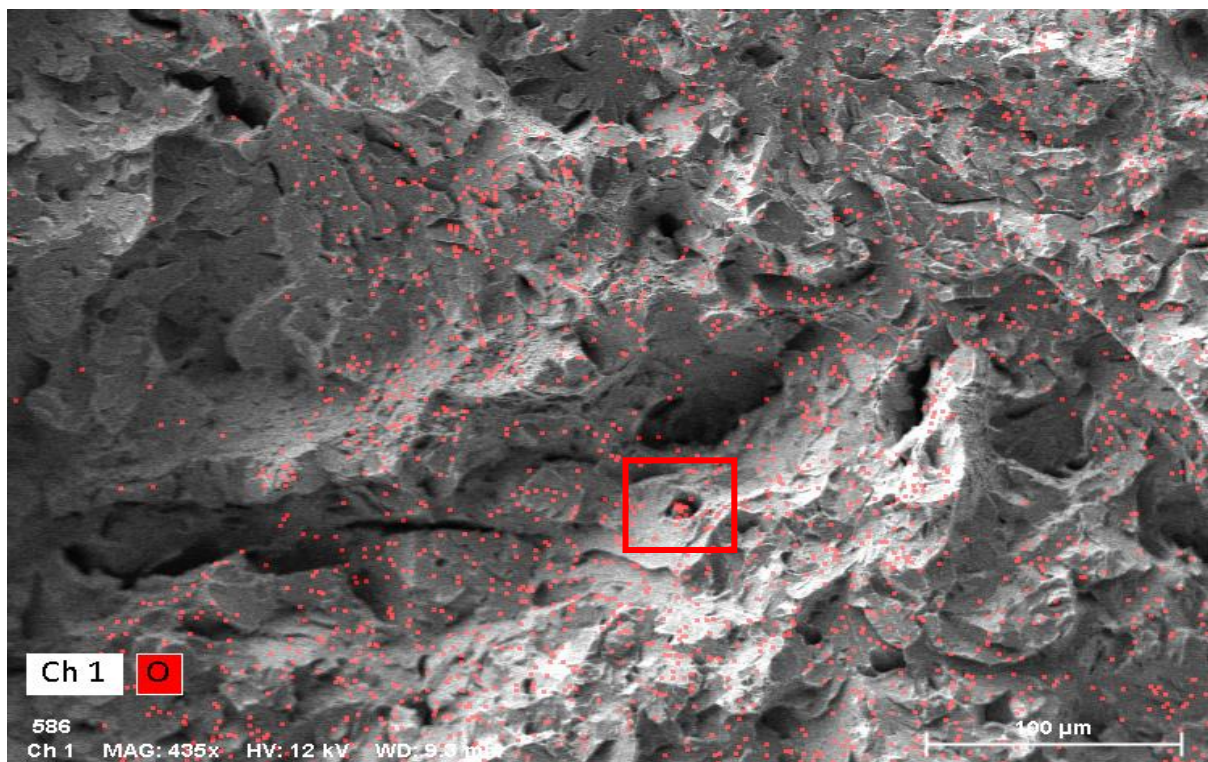


Figura 118 – Região analisada com mapeamento de oxigênio na região de fratura para o CP14

Foi observado que a indicação apresentou concentração de oxigênio bastante superior se comparada ao entorno da região analisada. Com essa concentração de oxigênio observada uma microanálise de elementos (EDS) neste ponto em específico foi realizada, conforme demonstrado na Figura 119.

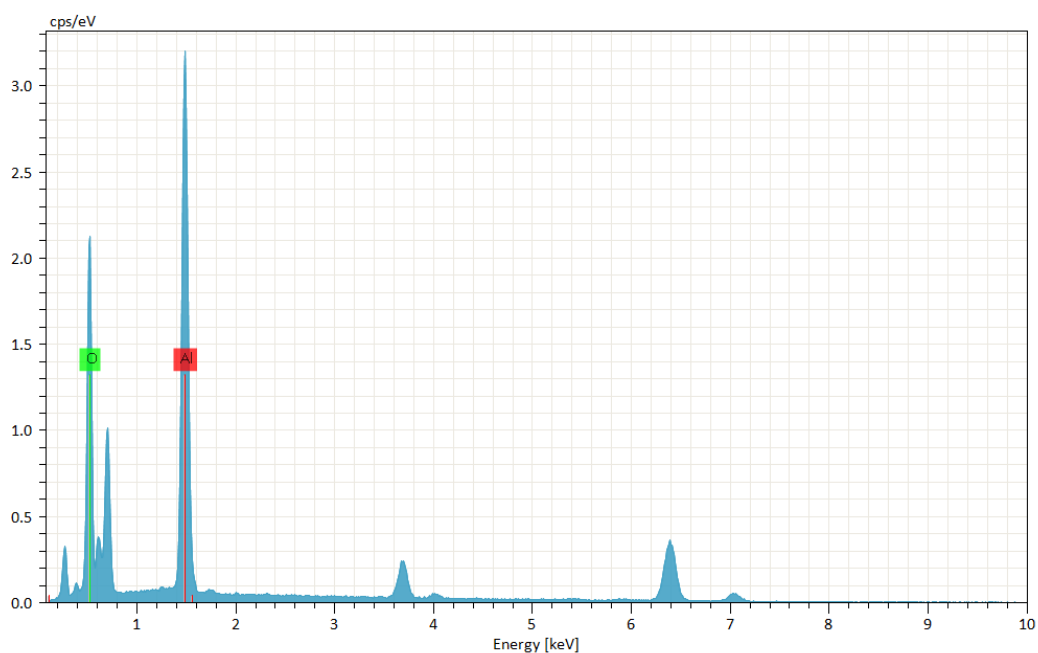


Figura 119 – Concentração de elementos referente a inclusão observada na região da fratura referente ao CP14

Foi observado que os elementos predominantes na região analisada foram o oxigênio e alumínio.

A Figura 120 referiu-se ao CP08 na região da fratura de um dos corpos de prova do ensaio de impacto (charpy), foram observadas mais de uma inclusão em formatos distintos, duas destas foram destacadas para análise da composição por EDS. O mapeamento de oxigênio foi realizado para compreensão da do defeito.

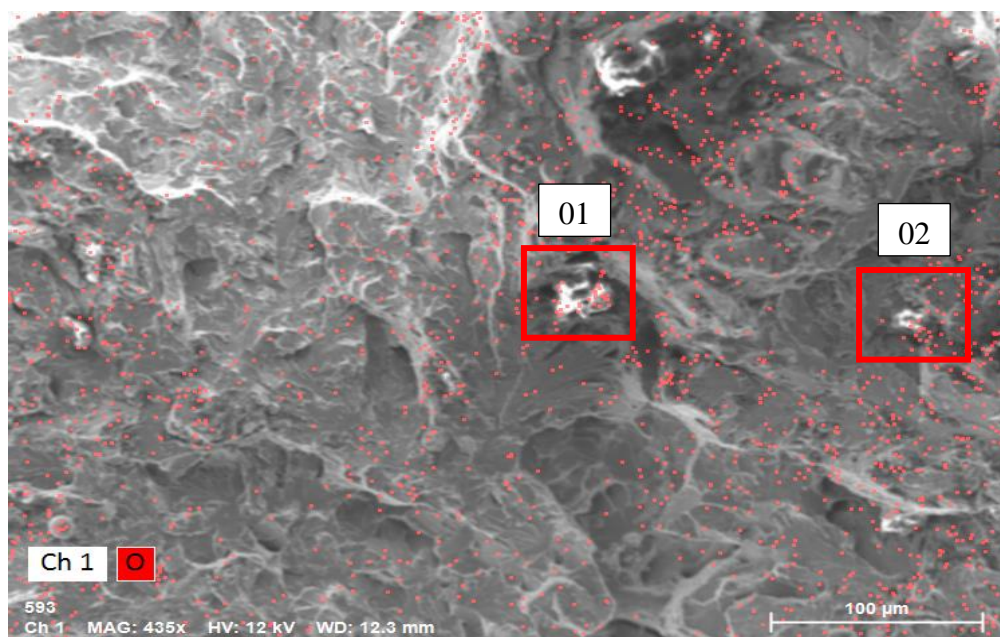


Figura 120 – Região analisada com mapeamento de oxigênio na região mapeada referente ao corpo de prova 14 (CP14)

Foram observados nessa região alguns pontos com concentração de oxigênio superior se comparados aos seus entornos respectivamente.

Com essas concentrações de oxigênio observadas uma microanálise de elementos nos pontos 01 e 02 foram realizadas. A Figura 121 demonstra a microanálise de elementos (EDS) para o ponto 01.

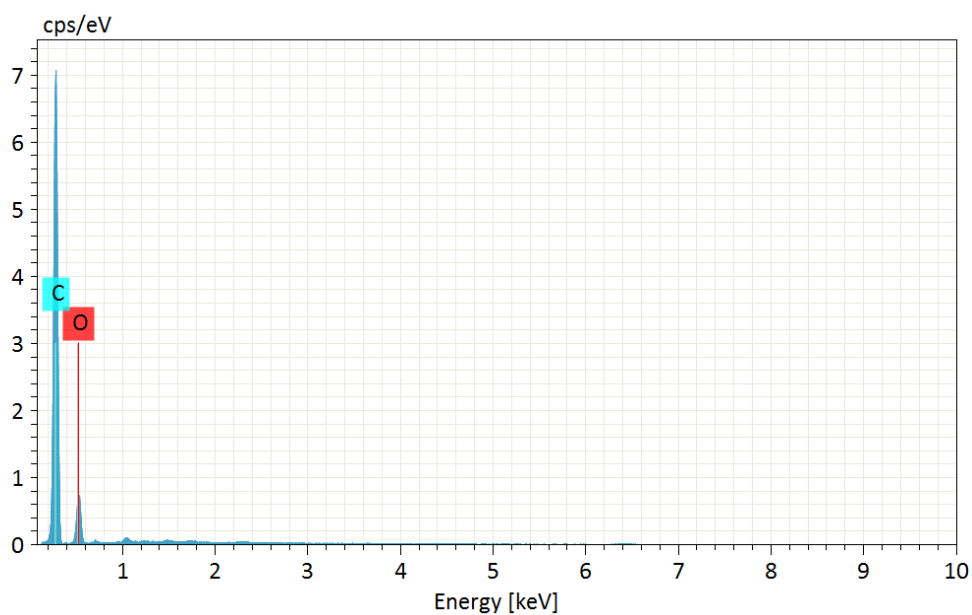


Figura 121 - Concentração de elementos referente a inclusão 01 observada na região da fratura referente ao corpo de prova 08 (CP08)

Foi observado que os elementos predominantes na região analisada foram o carbono e oxigênio. Mantendo o conceito, o ponto 02 foi analisado, conforme demonstrado na Figura 122.

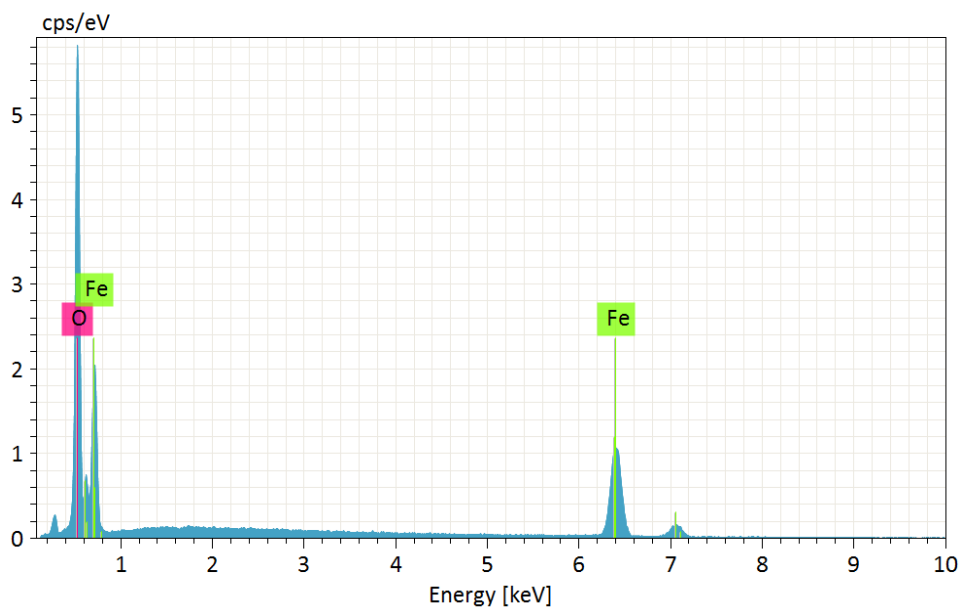


Figura 122 - Concentração de elementos referente a inclusão 02 observada na região da fratura referente ao corpo de prova 08 (CP08)

Foi observado que os elementos predominantes na região analisada foram o oxigênio e ferro.

5 CONCLUSÕES

Entender os mecanismos de formação de reoxidação em componentes fundidos por gravidade se mostra essencial no processo de fundição, como principal defeito do processo além de elevados custos de retrabalho e altas taxas de refugo pode ser prejudicial as propriedades mecânicas do componente, levando a necessidade de elevados fatores de segurança no projeto do componente a fim de garantir a aplicabilidade final.

A metodologia aplicada neste estudo pela implantação dos objetivos do MAGMASOFT[®] se mostrou eficiente para avaliação de defeitos de reoxidação se comparada a metodologia aplicada por Majidi [14] em componentes fundidos por gravidade.

Com os resultados obtidos, se torna necessário não somente entender o conceito de fundição por gravidade com ataque pelo fundo (sistema de enchimento tipo cachimbo), mas também estudar as possibilidades oriundas do mesmo, visto a discrepância de resultados obtidos para projetos com o mesmo conceito.

Realizar análises comparativas entre os resultados visuais pela tecnologia SNPFM, definindo o melhor sistema a ser utilizado somente por estes demonstra alta probabilidade de erro de interpretação. Objetivar diferentes resultados dentro do *software* analisando os resultados absolutos adquiridos se mostrou a maneira mais correta de utilização da tecnologia.

A exposição de metal líquido ao ar avaliada pelos resultados de VOF – Canais [-], VOF – Peça [-] e aprisionamento de ar [%] podem ser utilizadas para prever inclusões de reoxidação no produto final, porém não seu posicionamento final.

A metodologia aplicada neste estudo a fim de entender os mecanismos de formação de reoxidação em componentes fundidos por gravidade se mostra promissora, comparativos entre sistemas de enchimento podem ser realizadas e servir como base de dados para desenvolvimento de novos conceitos, com compreensão detalhada de ocorrência durante o processo, possibilitando a otimização de projetos de fundição com base em dados absolutos, dando segurança a aplicabilidade final do componente fundido.

Quebras de fluxo na queda vertical do metal líquido, diminuindo a altura de queda efetiva entre a panela e parte inferior do sistema de canais possuem viabilidade de aplicação, podendo reduzir os resultados de superfície de metal exposta ao ar [-], aprisionamento de ar [%], inclusão por área [%] e inclusão por volume [%].

Com os resultados obtidos nas gerações simuladas foi possível observar que sistemas helicoidais (CP17 e CP18) ou com características similares a um helicoide possuem viabilidade de aplicação, em processos com maior liberdade geométrica como o 3DSP tais

resultados podem ser otimizados, liberdade essa não alcançada no sistema de moldagem convencional por manilhas refratárias.

Os resultados de inclusão por área [%] e inclusão por volume [%] podem ser utilizados para refinamento dos resultados obtidos para VOF – Canais [-], VOF – Peça [-] e aprisionamento de ar [%]. Deve-se levar em consideração que estes resultados possuem alta viabilidade de aplicação em escala industrial,

A redução de superfície de metal exposto ao ar em canais e peças (VOF – Canais e VOF – Peça) e aprisionamento de ar [%] pelo correto dimensionamento do sistema de enchimento, conseqüentemente reduzindo os resultados obtidos por simulação para inclusão por área [%] e inclusão por volume [%] não alteraram significativamente as propriedades mecânicas dos componentes fabricados.

A definição do projeto final do sistema de enchimento deve ser avaliada com uma relação de custo/benefício, já que é observado que a redução dos defeitos de reoxidação oriundos do processo elevam o grau de dificuldade da montagem do sistema de canais, conseqüentemente elevando o *lead time* produtivo e aumento os custos de produção. Deve-se ter em mente que o melhor sistema de enchimento é aquele que atende os pré-requisitos estabelecidos com o menor custo de produção.

Os resultados analisados de forma comparativa entre as quantidades de inclusões observadas na metalografia realizada mostraram tendência crescente do corpo de prova CP14 para o CP08, resultados do melhor para o pior por simulação numérica, mostrando correlação entre os mesmos.

Os ensaios mecânicos realizados não foram conclusivos referente a influência das inclusões observadas e suas quantidades na alteração das propriedades e características mecânicas para o material estudado.

As análises realizadas por MEV e EDS entre corpos de prova não foram realizadas para comparação quantitativa, por ser uma análise pontual que pode não reproduzir a média, todavia foi possível observar em todas as inclusões analisadas continham altas concentrações de oxigênio, desta forma foi possível afirmar que a inclusões em sua maioria foram oriundas de reoxidação

6 REFERÊNCIAS

- [1] S. R. Sama, “Investigation into non-conventional mold designs using 3D sand-printing ins castings,” *Master of Science*, 2018.
- [2] W. Marquardt, “Continuing the Conversetation - Naturally Pressurized Fill System,” SFSA Technical and Operating Conference 2018, Chicago, IL, 2018.
- [3] J. Campbell, *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, 2015.
- [4] A. J. Melendez, K. D. Carlson e C. Beckermann, “Modeling of Reoxidation Inclusion Formation in Steel Casting,” *International Journal of Cast Metal Research vol.32*, pp. 624-638, 2009.
- [5] S. Majidi e C. Beckermann, “Simulation of Air Entrainment During Mold Filling: Comparasion with Water Modeling Experiments,” *Proceedings of the 71st SFSA Technical and Operating Conference*, pp. Paper No 3.2, Steel Founders` Society of America, Chicago, IL, 2017.
- [6] C. G. d. Oliveira, W. L. Guesser e I. Baumer, “O uso da simulação numérica do processo de fundição no desenvolvimento de peças em ferro fundido nodular,” IV SEMINÁRIO DE FUNDIÇÃO, Volta Redonda, Rio de Janeiro, 2013.
- [7] G. E. Vieira, “Uma revisão sobre a aplicação de simulação computacional em processos industriais,” XIII SIMPEP, Bauru, São Paulo, 2006.
- [8] R. J. d. Oliveira e A. C. Galhardi, *Simulação Numérica e a Fundição de Metais do Brasil*, São Paulo: CEETEPS - Unidade de Pós-Graduação Extensão e Pesquisa, 2016.
- [9] P. D. Ingle e B. E. Narkhede, *A Literature Survey of Methods to Study and Analyze the Gating System Design for its Effects on Casting Quality*, Mumbai MS: Materials Today: Proceedings 5 (2018) 5421-5429, 2018.
- [10] J. Finardi, “Refino e Desoxidação de Aço Destinado a Peças Fundidas,” *ABIFA - CONAF 93*, p. São Paulo, 1993.
- [11] J. Moore e G. K. Bodor, “Steel Desoxidation Praticice: Special emphasis on Heavy Section Steel Castings,” *Transactions of the AFS v.93*, pp. 46-49, 1985.
- [12] R. Fuoco, “Fratura Intergranular em Peças Fundidas de Aço Devido à Precipitação de Nitretos de Alumínio ("Rock Candy"),” *Tecnologia em Metalurgia e Materiais v.1, n. 3*, pp. 82-85, 2005.
- [13] J. Campbell, “Melting, Remelting, and Casting for Clean Steel,” *Steel Research International*, 2017.
- [14] S. H. Majidi, “Modeling of air entrainment and oxide inclusion formation during pouring of metal castings,” University of Iowa, Iowa, 2018.
- [15] J. Campbell, “Casting Praticice - The 10 Rules of Castings,” *Oxford: Elsevier*, 2004.
- [16] M. Blair, R. Monroe, C. Beckermann, R. Hardin, K. Carlson, C. Monroe e J. Griffin, *Design Realible Castings*, Warrendale, PA: Shape Castings: John Campbell Symp., 2005.
- [17] K. Wunnenberg, S. Millman, M. Nadif, C. Marique, M. Sumida e H.-J. Weddige, “IISI Study on Clean Steel,” *International Iron and Steel Institute*, 2004.
- [18] R. Fuoco, *Efeito do sistema de canais na geração de defeitos de fundição*, São Paulo, SP: 17º Congresso de Fundição - CONAF 2017, 2017.
- [19] D. Carlson e C. Beckermann, *Modeling of Reoxidation Inclusion Formation During Mold Filling of Steel Castings*, Iowa City: The University of Iowa, 2005.

- [20] I. Hahn e J. C. Sturm, Simulation evolves to autonomous optimization, Aachen, Germany: MAGMA GmbH, 2019.
- [21] H. Iqbal, K. Sheik, A. Al-Yousef e M. Younas, Mold Design Optimization for Sand Casting of Complex Geometries Using Advance Simulation Tools, Dhahran, Arábia Saudita: Materials and Manufacturing Processes, 2012.
- [22] L. Sachim e S. Rajendra, Design optimization of gating and feeding system throught simulation technique for sand casting of wear plate, Jalgaon, India: Perspectives in Science, 2016.
- [23] D. You, K. Michelic, P. Presoly, L. Jianhua e C. Bernhard, “Modeling Inclusion Formation during Solidification of Steel: A Review,” Chair of Ferrous Metallurgy, Leoben, Austria, 2017.
- [24] J. A. Griffin e C. E. Bates, “Ladle Treating, Pouring and Gating for the Production of Clean Steel Castings,” *Steel Founder`s Society of America Report No. 104*, 1991.
- [25] J. Kolososky, Estudo de Sistemas de Canais para Fundição de Ligas de Alumínio por Gravidade, São Paulo: Universidade Federal de Campinas, 2001.
- [26] D. Mouaze, F. Murzyn e J. Chaplin, Free Surface Lenght Scale Estimation in Hydraulic Jumps, *Journal of Fluids Engineering*, 2005, Vol. 44, pp. 563-596, 2005.
- [27] D. Hrabina e P. Filip, “ADVANCES IN THE POURING OF STEEL CASTINGS WITH A SHROUDED METAL STREAM,” *Foundry Praticice Magazine* 267, 2019.
- [28] K. Kiger e J. Duncan, Air Entrainment Mechanisms in Plunging Jets and Breaking Waves, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012, Vol. 44, pp. 563-596, 2012.
- [29] R. Fuoco, Defeitos de Fundição - Inclusões, Joinville - SC: CINTEC 2014, 2014.
- [30] R. Fuoco, Turbulência gerada no vazamento de uma panela tipo válvula e agravada pela elevada distância entre a válvula e bacia de vazamento, *Metso Minerals*, 2014.
- [31] J. Campbell, Castings, Butterworth-Heinemann Ltda - 1st edition p.287, 1991.
- [32] Chanson. H e J. Lee, “Plunging Jet Characteristics of Plunging Breakers,” *Coastal Engineering*, Vol. 31, No 1-4, Julio., pp. pp. 125-141, 1997.
- [33] M. Derakhiti e J. T. Kirby, Bubble Entrainment and Liquid-bubble interaction Under Insteady Breaking Waves, *J. Fluid Mech* 2014, Vol. 761, pp. 464-506, 2014.
- [34] G. Love, R. Pettit e R. Messenger, “Particle aggregation in microgravity: Informal experiments on the International Space Station,” *Meteoritics & Planetary Science* 49, Nr 5, 732–739 (2014), 2014.
- [35] J. M. Zhang, S. X. Li, Z. G. Yang, G. Y. Li, W. J. Hui e Y. Weng, Influence of inclusion size on fatigue behavior of high strength steels in the gigacycle fatigue, Shenyang, China: *International Journal of Fatigue*, 2007.
- [36] K. M. Sigl, R. A. Hardin, R. Stephens e C. Beckermann, Fatigue of 8630 Cast Steel in the Presence of Shrinkage Porosity, Chicago, IL: Proceedings of the 57th SFSA Technical and Operating Conference, 2003.
- [37] F.-Y. Hsu, M. R. Jolly e J. Campbell, “A MULTIPLE-GATE RUNNER SYSTEM FOR GRAVITY CASTING,” Department of Materials Science and Engineering, National United University,, Taiwan, 2009.
- [38] S. R. Sama, T. Badamo, P. Lynch e G. Manogharan, Novel sprue designs in metal casting via 3D sand-printing, *Additive Manufacturing* 25 (2019) 563–578, 2019.
- [39] M. Tiryakioglu, D. Askeland e C. Ramsay, Fluidity of 319 and A356: an experimental design approach, *Trans.-Am. Foundrymens Soc.* pp. 19-26, 1995.

- [40] C. Beckermann, Water modeling of steel flow, air entrainment and filtration, SFSA T&O Conference, 1992.
- [41] R. Hartmann, “Estudo do Sistema de Enchimento de Aços ao Carbono em Moldes de Areia Cuca-frio Através de Simulação Numérica,” 2012.
- [42] S. Majidi e C. Beckermann, Effect of Pouring Condition and gating System Design on Air Entrainment During Mold Filling, Iowa City, IA: International journal of metalcasting, 2018.
- [43] L. Povlak e J. C. Sturm, “Reduction of Oxide Inclusions in Aluminum Cylinder Heads through Virtual Design of Experiments,” International Journal of Metalcasting . Apr2017, Vol. 11 Issue 2, p174-188. 15p., 2017.
- [44] S. Majidi e C. Beckermann, “Modeling of Air Entrainment During Pouring of Steel Castings,” *Paper No 4.8, Steel Founder`s Society of America*, p. Proceedings of the 70th SFSA Technical and Operating Conference, 2016.
- [45] J. Campbell, Complete Casting Handbook: Metal Casting Process, Techniques and Design, Oxford, London: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [46] R. Dojka, J. Jezierski e J. Campbell, “Optimized Gating System for Steel Castings,” *Metals - Open Access Metallurgy Journal* 8 (4):266, 2018.
- [47] K. Carlson e C. Beckermann, Modeling of Reoxidation Inclusion Formation During Mold Filling of Steel Castings, Iowa City, IA: The University of Iowa, 2005.
- [48] S. Henschel e L. Kruger, “Modelling of Crack Initiation in a G42CrMo4 Steel with Non-Metallic Inclusions,” Institute of Materials Engineering, Technische Universitat, Freiberg, Germany, 2015.
- [49] S. Henschel, S. Dudczig, L. Kruger e C. G. Aneziris, Effect of non-metallic inclusions and shrinkage cavities on the dynamic fracture toughness of a high-strength G42CrMo4 cast steel, Catania, Italia: 21st European Conference on Fracture, ECF21, 2016.
- [50] S. Henschel e L. Kruger, Effect of inhomogeneous distribution of non-metallic inclusions in crack path deflection in G42CrMo4 steel at different loading rates, Freiberg, Alemanha: Frattura ed Integrità Strutturale, 2015.
- [51] A. Hardin e C. Beckermann, “Effect of Cooling Rate and Microporosity on Mechanical Performance,” Proceedings of the 70th SFSA Technical and Operating Conference, Chicago, IL, 2016.