



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
MESTRADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS



Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA RESULTANTE DE VARIAÇÕES NO
TRATAMENTO *IN MOLD* PARA PRODUÇÃO DE FERRO FUNDIDO NODULAR**

Cláudio Lúcio Pereira dos Santos

Belo Horizonte

2022

Cláudio Lúcio Pereira dos Santos

Avaliação da microestrutura resultante de variações no tratamento *in mold* para produção de ferro fundido nodular

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET – MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Coorientador: Prof. Dr. Joel Lima

Belo Horizonte

2022

Santos, Cláudio Lúcio Pereira dos.
S237a Avaliação da microestrutura resultante de variações no tratamento
in mold para produção de ferro fundido nodular / Cláudio Lúcio
Pereira dos Santos. – 2022.
126 f. : il.
Orientadora: Elaine Carballo Siqueira Corrêa.
Coorientador: Joel Lima.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2022.
Bibliografia.

1. Ferro fundido nodular. 2. Microestrutura. 3. Grafita. 4. Ligas
(Metalurgia) - Propriedades mecânicas. I. Corrêa, Elaine Carballo
Siqueira. II. Lima, Joel. III. Título.

CDD: 671.36

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 10 / 2022 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.026365/2022-59

Belo Horizonte-MG, 26 de maio de 2022.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

?AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA RESULTANTE DE VARIAÇÕES NO TRATAMENTO "IN MOLD" PARA PRODUÇÃO DE FERRO FUNDIDO NODULAR?

Autor: Cláudio Lúcio Pereira dos Santos

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Coorientador: Prof. Dr. Joel Lima

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 27 de Maio de 2022 esta Dissertação:

Prof.^a Dr.^a Elaine Carballo Siqueira Corrêa (ORIENTADORA)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Joel Lima (COORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Wellington Lopes (EXAMINADOR INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais ? CEFET-MG

Prof. Dr. Carlos Alberto Silva de Miranda (EXAMINADOR EXTERNO)
Universidade Estadual de Minas Gerais - UEMG

Prof.^a Dr.^a Tânia Nogueira Fonseca Souza (EXAMINADORA EXTERNA)
Universidade de Itaúna - UIT

(Assinado digitalmente em 27/05/2022 16:05)
ELAINE CARBALLO SIQUEIRA CORRÊA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 2506564

(Assinado digitalmente em 27/05/2022 16:14)
JOEL LIMA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 392287

(Assinado digitalmente em 27/05/2022 16:10)
WELLINGTON LOPES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 2579287

(Assinado digitalmente em 27/05/2022 16:30)
CARLOS ALBERTO SILVA DE MIRANDA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 005.248.066-67

(Assinado digitalmente em 30/05/2022 11:31)
TÂNIA NOGUEIRA FONSECA SOUZA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 477.084.256-20

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **10**, ano: **2022**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **26/05/2022** e o
código de verificação: **29ad7ea9a7**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir aprender, crescer e que, pela dádiva da vida, realizar tantos sonhos nesta existência. Agradecer por não me permitir desistir nesta longa caminhada de aprendizado.

À minha esposa Lúncria Aparecida Pereira Lúcio e ao filho Filipe Antônio Pereira Lúcio pela ajuda e pelo inesgotável incentivo.

À minha mãe pelos ensinamentos e exemplos a mim dados.

À minha orientadora professora doutora Elaine Carballo Siqueira Corrêa pela dedicação e competência no acompanhamento do trabalho. Obrigado por acreditar em mim e pelos tantos elogios e incentivos. Tenho certeza que não chegaria neste ponto sem o seu apoio.

Ao meu coorientador professor doutor Joel Lima pelo apoio constante.

Ao CEFET-MG, pela excelente instituição de ensino, e a CAPES, pelo incentivo ao programa de pós-graduação.

À CAPES, pelo investimento e incentivo ao programa de pós-graduação;

Aos membros da banca, pela pronta aceitação em participar da defesa de dissertação.

À Empresa Tupy Minas Gerais Ltda e aos meus estimados amigos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho em especial: Alécio Antônio Martins de Oliveira, Antenor José de Souza, Breno César Marçal Ribeiro, Érica Aparecida Silva Ribeiro, Jacinto Oliveira Franca, Pedro Augusto Diniz Carvalho e Rodrigo Leonardo Bruno Diniz.

RESUMO

O ferro fundido nodular é um importante material de engenharia por possuir excelente combinação de propriedades mecânicas e metalúrgicas, sendo principalmente aplicado na fabricação de componentes na indústria mecânica pesada e, particularmente, no setor automobilístico. Apresenta grafita na forma de nódulos ou esferoides e, dependendo da matriz metálica, associa valores de limites de resistência e alongamento, fundamentais em certos projetos. Para alcançar estas características, requer, durante sua produção, adequado tratamento de nodularização, etapa do processo em que se determina a mudança na grafita. As ações adotadas para o processo de nodularização no molde do presente estudo são as alterações das formas e dimensões da câmara de reação (esférica e retangular) e na proporção de liga nodularizante. Nos experimentos foram fundidos corpos de prova escalonados com diferentes seções para verificar a influência da velocidade de resfriamento na formação da grafita esferoidal e na constituição da matriz metálica, de forma a demonstrar a eficácia da nodularização in mold e apresentar os resultados de microestrutura e dureza para cada espessura e um corpo de prova de tração para comparar as propriedades mecânicas para cada condição. O procedimento experimental permitiu identificar a relação entre as formas e dimensões da câmara de reação com a microestrutura. Determinou-se também a menor proporção de liga para que a reação de nodularização se complete, sem comprometer a microestrutura e as propriedades desejadas para o produto. Foi verificado que o processo in mold possibilita um eficiente controle da nodularização e, como consequência, elevado grau de nodularização. As formas esférica e retangular apresentaram grau de nodularização acima de 90%. A câmara esférica apresentou maior grau de nodularização em relação à câmara retangular nos canais de distribuição, proporcionando resultados de limite de resistência a tração e limite de escoamento superiores aos resultados de câmara retangular. As conclusões da pesquisa representam contribuições relevantes para a fabricação de ferros fundidos nodulares, seriados ou não, com melhoria do processo de nodularização no molde e consequente redução de custos.

Palavras-chaves: Ferro fundido nodular. Nodularização no molde. Microestrutura.

ABSTRACT

Ductile iron is an important engineering material due to its excellent combination of mechanical and metallurgical properties, being mainly applied for manufacture of components in the heavy mechanical industry and, particularly, in the automotive sector. It presents graphite in the form of nodules or spheroidal and, depending on the metallic matrix, it associates values of ultimate tensile strength and elongation in certain projects. In order to achieve these characteristics, ductile iron requires, during its production, an adequate nodularization treatment, a process step in which the change in graphite is determined. The actions adopted for the nodularization process in the mold of the present study are changes in the shapes and dimensions of the reaction chamber (spherical and rectangular) and in the amount of nodularizing alloy. In the experiments, merged specimens with different sections were used to verify the influence of the cooling speed on the formation of spheroidal graphite and on the constitution of the metallic matrix, in order to demonstrate the effectiveness of nodularization in mold and to present the results of microstructure and hardness for each thickness and a tensile test specimen to compare the mechanical properties for each condition. The experimental procedure allowed to identify the relationship between the shapes and dimensions of the reaction chamber and the microstructure. The lowest proportion of alloy was also determined for the nodularization reaction to be completed, without compromising the microstructure and the desired properties of the product. It was found that the in mold process allows an efficient control of nodularization and, therefore, leads to a high degree of nodularization. The spherical and rectangular shapes showed a degree of nodularization above 90%. The spherical chamber presented a higher degree of nodularization in relation to the rectangular chamber in the distribution channels, providing results of ultimate tensile strength and yield strength superior to the results of the rectangular chamber. The research conclusions represent relevant contributions to the manufacture of ductile iron, serial or not, with an improvement in the nodularization process in the mold and consequent cost reduction.

Keywords: Ductile iron. In mold nodularization. Microstructure.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Ligas metálicas produzidas por fundição no Brasil	18
Gráfico 2 - Influência do silício no diagrama de fases Fe-C nas temperaturas eutéticas estáveis e metaestáveis	33
Gráfico 3 - Comparativo entre os processos considerando o rendimento do magnésio	44
Gráfico 4 - Relação entre magnésio residual e o fator de dissolução da liga	50
Gráfico 5 - Percentual de grafita nodular para as amostras avaliadas	61
Gráfico 6 - Resultados metalográficos no corpo de prova escalonado com 0,8% de liga nodularizante em câmara de reação na forma retangular.....	91
Gráfico 7 - Resultados metalográficos no corpo de prova escalonado com 1% de liga nodularizante em câmara de reação na forma retangular.....	92
Gráfico 8 - Resultados metalográficos no corpo de prova escalonado com 0,8% de liga nodularizante em câmara de reação esférica.....	93
Gráfico 9 - Resultados metalográficos no corpo de prova escalonado com 1% de liga nodularizante em câmara de reação esférica.....	94
Gráfico 10 - Resultados de contagem e tamanho de nódulos no corpo de prova escalonado com 0,8% e 1,0% de liga nodularizante em câmara de reação na forma retangular.....	97
Gráfico 11 - Resultados de contagem e tamanho de nódulos no corpo de prova escalonado com 0,8% e 1,0% de liga nodularizante em câmara de reação esférica.....	98
Gráfico 12 - Metalografia no corpo de prova de tração para as quatro condições de vazamento.....	100
Gráfico 13 - Resultados de dureza em corpo de prova escalonado para câmara retangular.....	102
Gráfico 14 - Resultados de dureza em corpo de prova escalonado para câmara esférica.....	102
Gráfico 15 - Variação da dureza por espessura para câmara esférica com 0,8% de liga.....	103
Gráfico 16 - Variação da dureza por espessura para câmara esférica com 1% de liga.....	103

Gráfico 17 - Variação da dureza por espessura para câmara retangular com 0,8% de liga.....	103
Gráfico 18 - Variação da dureza por espessura para câmara retangular com 1% de liga.....	104
Gráfico 19 - Resultados de propriedades mecânicas.....	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de um esqueleto de grafita na célula eutética.....	24
Figura 2 - Amostra de ferro fundido nodular analisado em (MEV)	27
Figura 3 - Microestruturas observadas em diferentes espessuras no ferro nodular.	28
Figura 4 – Exemplo de corpo de prova escalonado	28
Figura 5 - Diagrama de equilíbrio Fe-C: solidificação de uma liga hipoeutética.....	29
Figura 6 - Diagrama de equilíbrio Fe-C: solidificação de uma liga eutética.....	30
Figura 7 - Diagrama de equilíbrio Fe-C: solidificação de uma liga hipereutética.....	31
Figura 8 - Influência do teor de silício nas temperaturas do diagrama de equilíbrio Fe-C.....	32
Figura 9 - Curvas de solidificação e classificação sugerida para morfologias de solidificação hipoeutética, hipereutética e eutética.....	34
Figura 10 - Curvas de amostras de análise térmica com inoculantes distintos	35
Figura 11 - Simples transferência.....	37
Figura 12 - Sandwich	38
Figura 13 - Tundish cover	38
Figura 14 - Tratamento no fluxo de metal – Flotret	39
Figura 15 - Panela rotativa	40
Figura 16 - Plug poroso	40
Figura 17 - Injeção	41
Figura 18 - Imersão por sino	42
Figura 19 - Conversor Georg Fischer.....	42
Figura 20 - Arame contendo magnésio – arranjo básico.....	43
Figura 21 - Nodularização in mold.....	44
Figura 22 - Área da seção longitudinal da câmara de reação	47
Figura 23 - Câmara de reação na forma retangular	52
Figura 24 - Demonstração das alturas (em mm) na câmara de reação na forma retangular.....	52
Figura 25 - Locais marcados de coletas de amostras metalográficas	54
Figura 26 - Molde de teste com câmara de reação na forma retangular.....	54
Figura 27 - Resultados de metalografia utilizando câmara de reação na forma retangular.....	55

Figura 28 - Ilustração indicativa da entrada e saída de metal na câmara de reação cilíndrica	55
Figura 29 - Molde de teste com câmara de reação na forma cilíndrica	57
Figura 30 - Resultados de metalografia utilizando câmara reação na forma cilíndrica	57
Figura 31 - Câmara de reação esférica	58
Figura 32 - Ilustração indicativa da entrada e saída de metal na câmara de reação esférica	58
Figura 33 - Demonstração das alturas na câmara de reação esférica	59
Figura 34 - Molde de teste com câmara de reação esférica	60
Figura 35 - Resultados de metalografia utilizando câmara de reação esférica	60
Figura 36 - Resumo da forma da grafita nas câmaras de reação	61
Figura 37 - Fluxograma do procedimento experimental.	62
Figura 38 - Imagem da placa integral	63
Figura 39 - Valores de módulos obtidos em software de simulação computacional do corpo de prova escalonado	64
Figura 40 - Projeto do ferramental, sistema de alimentação, enchimento e câmara de reação	65
Figura 41 - Simulação computacional do preenchimento da cavidade do molde.....	65
Figura 42 - Simulação computacional do perfil de porosidade após o resfriamento	66
Figura 43 - Imagem e detalhe do corpo de prova escalonado (dimensões em mm).	67
Figura 44 - Desenho do corpo de prova bruto para tração (dimensões em mm)	67
Figura 45 - Desenho do corpo de prova usinado para tração (dimensões em mm)	67
Figura 46 - Identificação no ferramental	68
Figura 47 - Identificação com 0,8% de liga nodularizante	68
Figura 48 - Identificação com 1,0% de liga nodularizante	69
Figura 49 - Moldes em areia sílico argilosa sintética.....	70
Figura 50 - Distribuição da liga nodularizante nas câmaras de reação	70
Figura 51 - Projeto do ferramental modificado	71
Figura 52 - Amostras analisadas no corpo de prova escalonado.....	72
Figura 53 - Analisador de Carbono e Enxofre CS744 da marca LECO.....	73
Figura 54 - Equipamento para análise de espectroscopia de emissão óptica.....	73
Figura 55 - Inoculante Fe-Si-Ba com lantânio	74
Figura 56 - Controle da temperatura de vazamento.....	75

Figura 57- Desenho da cunha para análise do coquilhamento (dimensões em mm).....	75
Figura 58 - Vazamento e medição da cunha para coquilhamento.....	76
Figura 59 - Moldes em areia sílico argilosa sintética.....	76
Figura 60 - Distribuição da liga nodularizante nas câmaras de reação.....	77
Figura 61- Pesagem da liga nodularizante nas câmaras de reação.....	77
Figura 62 - Liga Fe-Si-Mg com lantânio.....	77
Figura 63 - Regiões onde foram retiradas as amostras do corpo de prova escalonado e no sistema de canais.....	78
Figura 64 - Região onde foram extraídas as análises metalográficas no corpo de prova de tração.....	79
Figura 65 - Equipamentos Arotec utilizados na preparação das amostras.....	79
Figura 66 - Microscópio ótico utilizado.....	80
Figura 67- Amostras com os ensaios de dureza realizados.....	81
Figura 68 - Máquina de ensaio de dureza (Durômetro Metro-com).....	81
Figura 69 - Região onde foram realizadas ensaios de dureza no corpo de prova de tração.....	82
Figura 70 - Equipamentos para Ensaios de Materiais.....	82
Figura 71 - Preparação dos corpos de prova de tração.....	83
Figura 72 - Imagem do feixe e corpo de prova escalonado seccionado.....	84
Figura 73 - Análise metalográfica (grau de nodularização).....	85
Figura 74: Metalografia das seções do corpo de prova escalonado com 0,8% de liga.....	86
Figura 75 - Metalografia das seções do corpo de prova escalonado com 1,0% de liga.....	86
Figura 76 - Imagem do feixe referente a fusão principal.....	87
Figura 77 - Corpo de prova escalonado e massalote seccionado.....	87
Figura 78 - Análise metalográfica nos canais de distribuição.....	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ferro fundido cinzento: Propriedades, características e microestrutura..	24
Quadro 2 - Ferro fundido branco: Propriedades, características e microestrutura	25
Quadro 3 - Ferro fundido vermicular: Propriedades, características e microestrutura	25
Quadro 4 - Ferro fundido maleável: Propriedades, características e microestrutura.	26
Quadro 5 - Ferro fundido nodular: Propriedades, características e microestrutura ...	26
Quadro 6 - Tipo e motivos dos desvios das microestruturas de ferro fundido nodular.....	36
Quadro 7 - Principais vantagens apresentadas pelo processo In mold.....	45
Quadro 8: Desvantagens ou limitações de uso apresentadas pelo processo In mold.....	45
Quadro 9 - Microestruturas observadas em câmara de reação retangular para ferro fundido nodular.....	53
Quadro 10 - Microestruturas observadas em câmara de reação na forma cilíndrica para ferro fundido nodular.....	56
Quadro 11 - Microestruturas observadas em câmara de reação na forma esférica para ferro fundido nodular.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos itens das equações de (2) a (8)	49
Tabela 2 - Composição química das ligas nodularizantes	51
Tabela 3 - Resultados metalúrgicos em relação ao pretendido.....	70
Tabela 4 - Composição química de referência para o estudo proposto	72
Tabela 5 - Composição química do inoculante Fe-Si-Ba com lantânio	74
Tabela 6 - Temperaturas obtidas para cada molde.....	74
Tabela 7 - Composição química da liga FeSiMg com lantânio	77
Tabela 8 - Composição química obtida para o ajuste das variáveis de processo	84
Tabela 9 - Resultados da análise metalográfica.....	85
Tabela 10- Análise química do feixe com 0,8% de liga nodularizante.....	88
Tabela 11 - Análise química do feixe com 1,0% de liga nodularizante.....	88
Tabela 12 - Resultados metalúrgicos em relação ao pretendido.....	90
Tabela 13- Resultados de dureza brinell com 0,8% de liga nodularizante	101
Tabela 14- Resultados de dureza brinell com 1,0% de liga nodularizante	101
Tabela 15- Comparação da dureza nos corpos de prova escalonado e de tração para câmara esférica com 0,8% de liga	104
Tabela 16- Comparação da dureza nos corpos de prova escalonado e de tração para câmara esférica com 1,0% de liga	105
Tabela 17 - Comparação da dureza nos corpos de prova escalonado e de tração para câmara retangular com 0,8% de liga.....	105
Tabela 18 - Comparação da dureza nos corpos de prova escalonado e de tração para câmara retangular com 1,0% de liga.....	105
Tabela 19 - Resultados de propriedades mecânicas.....	106

LISTA DE ABREVIações, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABIFA	-	Associação Brasileira de Fundição
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASM I	-	ASM HANDBOOK International (<i>The Materials Information Company</i>)
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
CE	-	Carbono equivalente
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
Fe-C	-	Ferro-carbono
Fe-C-Si	-	Ferro-carbono-silício
Fe ₃ C	-	Cementita
γ	-	Austenita ou ferro gama
HCl	-	Ácido clorídrico
HV	-	Hardness Vickers
ISO	-	International Organization for Standardization
LIC	-	Limite inferior de controle
LSC	-	Limite superior de controle
MEV	-	Microscópio Eletrônico de Varredura
M ₇ C ₃	-	Carboneto primário
N	-	Newton
NBR	-	Norma Brasileira
N/mm ²	-	Newton por milímetro quadrado
Nódulos mm ²	-	Quantidade de nódulos por milímetro quadrado
P	-	Pressão
SAE	-	Society of Automotive Engineers
(t)	-	Tonelagem
T	-	Temperatura
T. liq.	-	Temperatura líquido
T. Eut.	-	Temperatura eutética
α	-	Ferrita ou ferro alfa
Mg (res)	-	Magnésio residual
σ	-	Desvio padrão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	18
2 OBJETIVOS.....	22
2.1 Objetivo geral	22
2.2 Objetivos específicos	22
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1 Características gerais dos ferros fundidos	23
3.2 Tipos de ferros fundidos.....	24
3.3 Caracterização do ferro fundido nodular	27
3.4 Sequência da solidificação dos ferros fundidos nodulares.....	28
3.4.1 Sequência da solidificação hipoeutética.....	29
3.4.2 Sequência da solidificação eutética	30
3.4.3 Sequência da solidificação hipereutética.....	30
3.4.4 Influência do silício no diagrama de fases Fe-C.....	31
3.4.5 Morfologia da solidificação com amostras para análise térmica.....	33
3.5 Tratamento de inoculação dos ferros fundidos nodulares.....	34
3.6 Principais tipos de processos de nodularização dos ferros fundidos	36
3.6.1 Simples transferência.....	37
3.6.2 Sandwich.....	37
3.6.3 Tundish cover.....	38
3.6.4 Tratamento no fluxo de metal – flotret.....	39
3.6.5 Panela rotativa	39
3.6.6 Plug poroso	40
3.6.7 Injeção.....	41
3.6.8 Imersão por sino.....	41
3.6.9 Conversor Georg Fischer	42
3.6.10 Arame contendo magnésio.....	43
3.6.11 Nodularização in mold	43
3.7 Particularidades da obtenção de ferro nodular através do processo in mold	45
3.7.1 Características gerais do processo	45
3.7.2 Elaboração do ferro fundido base	46

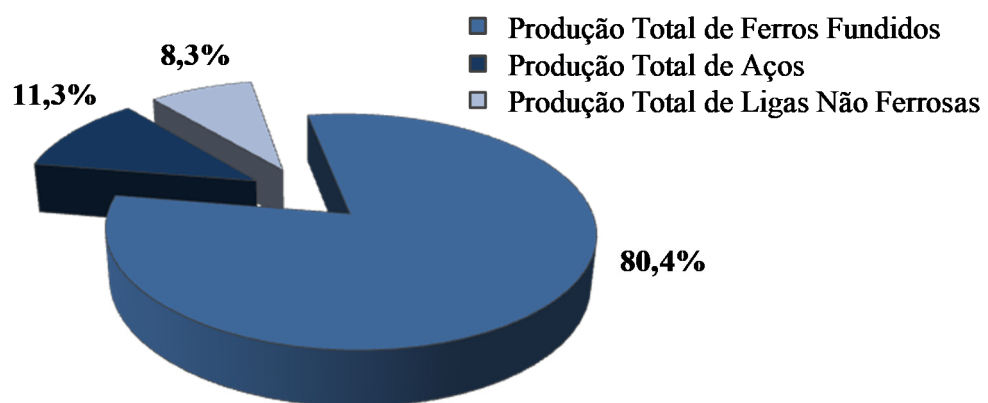
3.7.3 Dimensionamento da câmara de reação.....	46
3.7.4 O fator de dissolução da liga nodularizante.....	50
3.7.5 A liga nodularizante.....	51
3.8 Efeito da forma da câmara de reação na microestrutura	51
3.8.1 Câmara de reação na forma retangular.....	51
3.8.2 Câmara de reação na forma cilíndrica.....	55
3.8.3 Câmara de reação na forma esférica	57
3.8.4 Resultado comparativo entre as formas de câmaras de reação	60
4 MATERIAIS E MÉTODOS	62
4.1 Descrição geral e delimitação da pesquisa	62
4.2 Projeto e construção do ferramental	63
4.3 Dimensões dos corpos de prova	66
4.4 Identificação dos corpos de prova, componentes do sistema de alimentação e câmaras de reação.....	68
4.5 Ajuste das variáveis de processo	69
4.6 Modificação do projeto do ferramental após ajuste das variáveis de processo...	71
4.7 Fusão e vazamento.....	71
4.7.1 Análise química	71
4.7.2 Inoculação	73
4.7.3 Definição da temperatura de sobreaquecimento e vazamento	74
4.7.4 Análise de tendência ao coquilhamento.....	75
4.8 Confecção dos moldes de areia	76
4.9 Caracterização	78
4.9.1 Caracterização microestrutural.....	78
4.9.2 Ensaio de dureza	80
4.9.3 Avaliação das propriedades mecânicas	82
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
5.1 Ajuste das variáveis de processo	84
5.1.1 Características de fundição	84
5.1.2 Caracterização microestrutural.....	85
5.2 Fusão principal	87
5.2.1 Características de fundição	87

5.2.2 Caracterização microestrutural.....	90
5.2.2.1 Análise metalográfica no corpo de prova escalonado	90
5.2.2.2 Análise metalográfica nos canais de distribuição.....	99
5.2.2.3 Análise metalográfica no corpo de prova de tração	99
5.2.3 Ensaio de dureza	101
5.2.3.1 Ensaio de dureza no corpo de prova escalonado	101
5.2.3.2 Ensaio de dureza no corpo de prova de tração.....	104
5.2.4 Ensaio de tração	106
 6 CONCLUSÕES.....	 108
 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	 110
 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 111
 APÊNDICE A - Dimensionamento do sistema de canais	 116
 Figura A1 - Desenho do sistema de enchimento preliminar.....	 123
 APÊNDICE B - Modificação da coluna de vazamento após ajuste das variáveis de processo (fusão principal).....	 124
 Figura A2 - Desenho do sistema de enchimento da fusão principal.....	 126

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A indústria brasileira de fundição é uma das dez maiores produtoras de componentes fundidos do mundo. Segundo a Associação Brasileira de Fundição – ABIFA (2019), o Brasil no primeiro semestre de 2019 produziu 1,16 milhão de toneladas de peças, distribuídas em três grupos de ligas metálicas, conforme apresentado no Gráfico 1. Observa-se que os ferros fundidos representam 80,4% do total produzido e é neste contexto que o ferro fundido nodular está inserido, empregado na fabricação de componentes para a indústria mecânica pesada e, particularmente, para o setor automobilístico, cujos produtos exigem controle rigoroso de características mecânicas e metalúrgicas com padrão de qualidade mundial.

Gráfico 1: Ligas metálicas produzidas por fundição no Brasil.



Fonte: Adaptado de ABIFA (2019).

A utilização de ferros fundidos nodulares, por exemplo, na fabricação de componentes automotivos em todo o mundo tem sido ampliada desde as décadas de 1970 e 1980 (CAI; WEI, 2008). Em adição à resistência mecânica e à capacidade de deformação, essa última considerada excepcional para um ferro fundido, a ponto de ser denominado ferro dúctil, o ferro fundido nodular reúne ainda as especificidades dos ferros fundidos em geral, como a fluidez, que viabiliza a obtenção de geometrias complexas, e a resistência à oxidação, devendo ainda ser considerada a questão econômica (WANG, 2006).

O crescente interesse nas três últimas décadas pelo estudo do ferro fundido nodular se fundamenta na capacidade deste material de combinar, no estado bruto de fundição, ductilidade e resistência mecânica, características propiciadas pela forma

esferoidal ou nodular da grafita. Esta combinação de propriedades posiciona esse tipo de ferro fundido como uma alternativa potencial para substituir os aços em muitas aplicações industriais, com diversas vantagens, como menor peso final e custo de produção reduzido, além de aspectos estratégicos, uma vez que sua logística de produção é também diferente, se comparada à dos aços (AKINRIBIDE et al. 2021; WANG et al. 2020; IACOVIELLO et al. 2018).

Entretanto, um item importante para garantir a qualidade dos componentes produzidos em ferro fundido nodular são os métodos ou tratamentos de nodularização, processo no qual ocorre a adição de elementos de liga responsáveis pelo mecanismo de modificação da morfologia da grafita, ou sua esferoidização, chamados, nodularizantes, como o magnésio, capaz de definir a microestrutura do material durante a fundição sem a necessidade de tratamentos térmicos prolongados e elevados custos (IACOVIELLO et al. 2018). O cenário mundial, por motivos diversos, acena com a expectativa e demanda por materiais de engenharia com combinação de propriedades mecânicas e tecnológicas excepcionais e o ferro fundido nodular se enquadra como uma atraente opção para atender aos padrões de engenharia e às novas considerações de design (ERASLAN et al. 2021).

A técnica para tratamento do ferro nodular pode ser feita na panela de vazamento, considerado o método mais empregado pelas fundições de peças de grande porte e não seriadas, mas também no molde, opção de algumas empresas que produzem autopeças em larga escala (ASM HANDBOOK, 2008 e BROWN, 2000).

Para garantir a qualidade dos componentes produzidos em ferro fundido nodular, determinadas técnicas devem ser empregadas para controle do processo de fabricação. Os procedimentos antes do tratamento de nodularização são: i) preparação do ferro base; ii) análise química por espectroscopia de emissão ótica; iii) análise térmica para determinação das curvas de solidificação e iv) medição da temperatura da liga no forno. Por outro lado, as técnicas indicadas após o tratamento de nodularização são: i) análise química por espectrometria; ii) obtenção de amostra metalográfica para análise posterior da microestrutura; iii) obtenção de amostra de cunha para avaliação da inoculação e iv) medição da temperatura da liga para vazamento no molde. A amostra metalográfica e a amostra em cunha podem ser substituídas por testes de análise térmica após tratamento de nodularização com pontos-chave de amostragem em regiões estratégicas, como próximo às estações de tratamento para avaliação da eficiência desse ou na linha de vazamento para estimar

as características finais do processo, como por exemplo: grau de nodularização, tendência a formar carbonetos (Fe_3C), percentual de perlita e ferrita e propriedades mecânicas, como resistência à tração (ANJOS, 2015).

Segundo Just e Pacyniak (2012), de todos os tipos de processos de nodularização existentes, o método *in mold* é o que apresenta “maior perfeição”, sendo ainda ecologicamente viável. Com a utilização desse processo, pode-se reduzir a proporção de liga nodularizante em relação às outras técnicas ou operações, alcançando valores de 0,7 a 1,0% de liga de magnésio e com um processo praticamente isento de fumaça, chegando a um rendimento desse elemento químico de até 80%, superior a todos os processos de nodularização conhecidos. Pelo fato da reação da liga nodularizante ocorrer no molde, o tempo entre a solidificação do metal e a reação é relativamente pequeno, o que melhora o desempenho da nodularização em comparação aos outros processos para o tratamento. A nodularização *in mold*, consiste em associar ao sistema de canais de enchimento, uma espécie de reservatório ou câmara de reação onde é adicionada a liga nodularizante. No momento do vazamento, o metal líquido flui pela câmara de reação e reage com a liga nodularizante, posteriormente preenchendo as cavidades (canais e peça) no molde (LERNER, 2003). No entanto, apresenta algumas variáveis que devem ter um controle apurado para garantir uma microestrutura de qualidade. O ajuste do processo normalmente é complexo devido a esse controle apurado, o que pode provocar inicialmente um alto refugo de peças. Para a produção de peças não seriadas, o processo é considerado inviável (COSTA, 1995).

Nesse sentido, problemas de microestrutura como imperfeição na formação de grafita nodular, grafita irregular, flotação de grafita, grafita explodida, grafita em grumos, grafita crab, grafita vermicular e precipitação de carbonetos podem ser observados. Dentro desse contexto, este trabalho teve como objetivo investigar o comportamento do fluxo do metal líquido e as alterações das formas e dimensões da câmara de reação (esférica e retangular), pelo processo de nodularização no molde, avaliando o impacto nos resultados de propriedades mecânicas, matriz metálica e grau de nodularização.

Pretende-se abordar a eficiência da proporção de liga nodularizante, variando de 0,8% e 1,0%, com a finalidade de definir um percentual de liga ideal para promover toda a reação necessária, obtendo uma microestrutura de qualidade em diferentes espessuras do corpo de prova. O estudo dessas variáveis poderia levar à definição

de um processo que eliminaria a necessidade de refugar uma grande quantidade de peças para o acerto da operação, tornando-o viável também para produções não seriadas, uma vez que aparentemente não são evidenciados estudos para a solução deste problema.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Neste trabalho pretende-se investigar o efeito das variações da proporção de liga nodularizante e da forma da câmara de reação nas respectivas microestruturas e propriedades mecânicas do ferro fundido nodular de classe ASTM A536-84 (2019), grau 80-55-06.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência de diversas espessuras do corpo de prova escalonado na microestrutura e na dureza do ferro fundido nodular produzido a partir do processo de nodularização in mold empregando câmara de reação retangular e esférica com 0,8% e 1,0% de liga nodularizante;
- Analisar em corpo de prova os efeitos da geometria da câmara de reação na microestrutura, na resistência mecânica e na ductilidade do ferro fundido nodular grau 80-55-06 produzido a partir do processo de nodularização in mold para 0,8% e 1,0% de liga nodularizante;
- Investigar os efeitos da variação da proporção de liga nodularizante (0,8% e 1,0%), na microestrutura, na resistência mecânica e na ductilidade do ferro fundido nodular produzido a partir do processo de nodularização in mold utilizando câmara de reação retangular e esférica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Características gerais dos ferros fundidos

Os ferros fundidos já eram conhecidos e utilizados desde a pré-história e a produção de ferro gusa para a fabricação dessas ligas apareceu por volta de 1400 DC na Bélgica. Com a grande quantidade de peças fabricadas na Europa, a partir dessa época, houve a necessidade do desenvolvimento da tecnologia desses materiais. Segundo Hughes (1968), os primeiros estudos sobre o diagrama de equilíbrio ferro-carbono surgiram no início do século XX, com o objetivo de entender a sequência de solidificação dos ferros brancos e o desenvolvimento da grafita nos ferros cinzentos. A análise térmica e o resfriamento brusco surgiram a partir da década de 1940, permitindo um grande avanço na tecnologia dos ferros fundidos.

Nos ferros fundidos com presença de grafita, dependendo da velocidade de resfriamento, da espessura da peça e dos elementos de liga, a microestrutura é composta de constituintes como perlita e ferrita (similar à microestrutura dos aços), dentre outros, e também porções de grafita. A grafita, por possuir baixa resistência mecânica, é visualizada como uma descontinuidade da matriz, podendo exercer efeito de concentração de tensões (GUESSER, 2009). As propriedades mecânicas das ligas podem ficar comprometidas devido à forma da grafita, dependendo da demanda do tipo de peça a ser fabricada. Por sua vez, a forma, o tamanho e o tipo de partículas de grafita estão diretamente relacionados ao processo de solidificação do constituinte eutético e às modificações nas variáveis de processo. Bunin et al. (1960), sugeriram que em cada célula eutética existe um esqueleto contínuo de grafita ramificado. Quando as partículas de grafita são finas a ramificação é grande e quando são grossas a ramificação é pequena. Este estudo foi confirmado pela análise da forma da grafita no interior da célula eutética em três dimensões utilizando microscopia eletrônica de varredura. Na Figura 1 é mostrado um esquema de um esqueleto de grafita na célula eutética (MORROGH, 1960). Nesse caso, quanto maior o super-resfriamento, maior o número de crescimento de células eutéticas, propiciando a formação de uma grafita mais fina.

Figura 1: Esquema de um esqueleto de grafita na célula eutética.



Fonte: Morrogh (1960).

3.2 Tipos de ferros fundidos

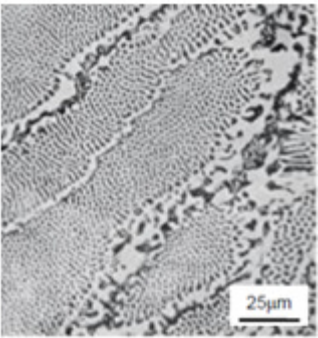
Dentro do conceito geral de ferros fundidos, as ligas podem ser classificadas em: ferro fundido cinzento, ferro fundido branco, ferro fundido vermicular, ferro fundido maleável e ferro fundido nodular. Essa divisão é dada de acordo com a presença ou não de grafita e, no caso da existência dessa, também com sua morfologia (GUESSER, 2009). Os Quadros 1, 2, 3, 4 e 5 apresentam uma síntese dos principais tipos de ferros fundidos.

Quadro 1: Ferro fundido cinzento: Propriedades, características e microestrutura.

FERRO FUNDIDO CINZENTO	
Características/conceito	Microestrutura
Denominado ferro fundido cinzento por motivos da fratura na cor acinzentada ao longo das lamelas de grafita (característico da presença de carbono livre sob a forma de grafita). A forma e distribuição das lamelas de grafita em sua estrutura o torna um material frágil. Entretanto, a grafita lamelar (entrecortando a matriz metálica) favorece a absorção de vibrações e confere ao ferro fundido uma melhor estabilidade dimensional, que pode ainda ser melhorada com a adição de elementos de liga, principalmente para os casos em que o componente trabalha com elevação de temperatura (NASCIMENTO; SANTANA, 2016).	 Fonte: DIN EN ISO 945-1:2009
Propriedades mecânicas	
• Limite de resistência: (N/mm²): 160-320 • Alongamento (%): não apresenta • Dureza (HB): 201-277 Fonte: NBR EB-126-1972.	

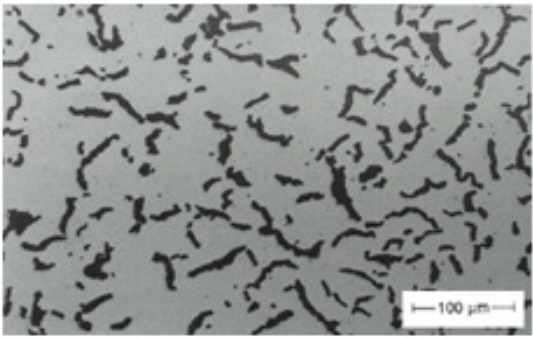
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 2: Ferro fundido branco: Propriedades, características e microestrutura.

FERRO FUNDIDO BRANCO	
Características/conceito	Microestrutura
Ferros fundidos brancos são ligas que possuem a superfície fraturada com uma coloração clara e brilhante, pelo fato de apresentarem em sua microestrutura o carbono na forma combinada, em carbonetos, sem presença de grafita. Este material é aplicado onde necessita-se de resistência ao desgaste e altos valores de dureza. Essas propriedades mecânicas são adquiridas devido ao fato do material apresentar grande quantidade de cementita (Fe_3C) e, eventualmente, outros carbonetos complexos, como M_3C e M_7C_3, onde o M representa ferro, cromo e outros elementos de liga (PRETI, 2003).	 Fonte: COLPAERT, 2008.
Propriedades mecânicas	
• Limite de resistência: (N/mm^2): não apresenta • Alongamento (%): não apresenta • Dureza (HB): 450-750 Fonte: ASTM A 532-1999.	

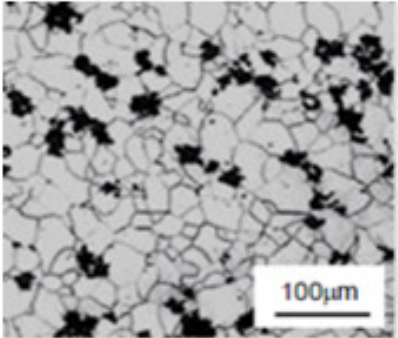
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 3: Ferro fundido vermicular: Propriedades, características e microestrutura.

FERRO FUNDIDO VERMICULAR	
Características/conceito	Microestrutura
Os ferros fundidos vermiculares são materiais comercializados mais recentemente que os demais, que apresentam a grafita em forma de vermes ou compacta, sendo assim também denominados de ferros fundidos com grafita compacta (GUESSER, 2009). A forma da grafita compacta oferece propriedades intermediárias entre os ferros fundidos cinzento e nodular. As propriedades mecânicas são, em geral, próximas às do ferro fundido nodular e as propriedades térmicas como expansão, condutividade térmica e resistência à fadiga térmica são aproximadas das do ferro fundido cinzento, aliando, portanto, características dos dois. Essas ligas apresentam ainda excelente fluidez e uma contração de solidificação menor que o ferro fundido nodular (BROWN, 2000).	 Fonte: BROWN, 2000.
Propriedades mecânicas	
• Limite de resistência: (N/mm^2): 300-600 • Alongamento (%): 6-3 • Dureza (HB): 170-260 Fonte: ISO 16112-2017.	

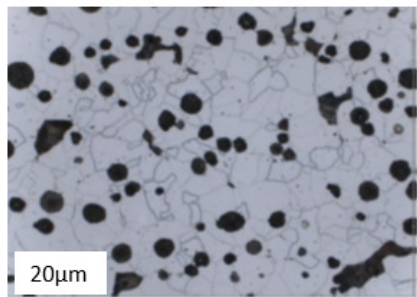
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4: Ferro fundido maleável: Propriedades, características e microestrutura.

FERRO FUNDIDO MALEÁVEL	
Características/conceito	Microestrutura
São ligas que possuem fragilidade limitada e microestrutura isenta de grafita no estado bruto de fusão, sendo obtidos a partir da realização de tratamentos térmicos de maleabilização nos ferros brancos, apresentando em sua estrutura final grafita com contornos rendilhados ou em agregados. Os ferros maleáveis de núcleo preto são submetidos a um tratamento em atmosfera protetora que permite a decomposição da cementita em grafita, tendo como resultado grafita esferoidal agregada, com fratura escura (NASCIMENTO; SANTANA, 2016). Já os de núcleo branco são aqueles submetidos a um tratamento em atmosfera oxidante, que permite a descarbonetação superficial controlada e no centro grafita em nódulos. Na superfície da peça, apresenta ferrita na microestrutura e no centro apresenta microestrutura ferrita/perlita e grafita em nódulos (COLPAERT, 2008).	 Fonte: COLPAERT, 2008.
Propriedades mecânicas	
• Limite de resistência: (N/mm²): 270-600 • Alongamento (%): 10-1 • Dureza (HB): 120-280 Fonte: ABNT NBR 6914-2017.	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 5: Ferro fundido nodular: Propriedades, características e microestrutura.

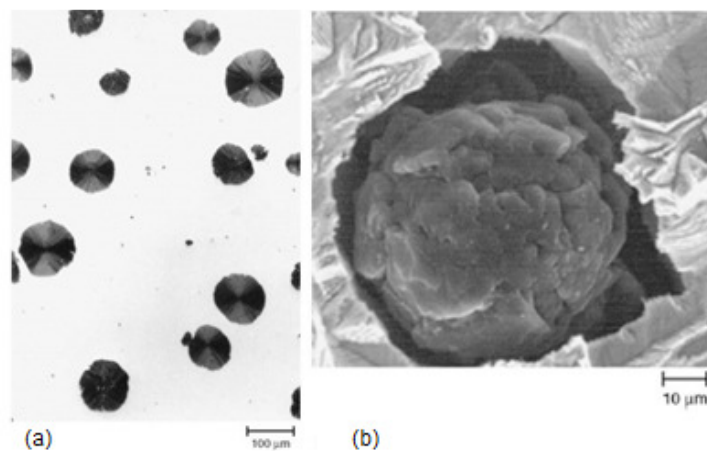
FERRO FUNDIDO NODULAR	
Características/conceito	Microestrutura
Ferros fundidos nodulares são materiais que possuem em sua microestrutura grafita em forma de nódulos, resultando em elevado limite de escoamento, ductilidade e tenacidade, o que permite a utilização dessas ligas em peças que exigem alta segurança (RADZIKOWSKA, 2004). Os principais elementos responsáveis pela formação da grafita para a forma esferoidal são o magnésio, em teores de 0,03% a 0,05%, e o cério, em teores de 0,005% a 0,020%, adicionados no metal líquido (LABRECQUE; CAGNE, 1998).	 Fonte: KAMIŃSKA, 2018.
Propriedades mecânicas	
• Limite de resistência: (N/mm²): 400-800 • Alongamento (%): 25-6 • Dureza (HB): 160-310 Fonte: DIN 1693 Teil 1 (10.73).	

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Caracterização do ferro fundido nodular

O ferro fundido nodular ou ferro dúctil é um material com uma ampla gama de aplicações. A utilização dessas ligas em quantidades industriais começou apenas no início do século 18 em Coalbrookdale, na Inglaterra. Até 1937, as ligas de ferro fundido eram relatadas apenas como ferro cinzento. Após essa data, Baumgart (2013) apresentou o ferro fundido nodular e sua produção começou aproximadamente em 1942, nos Estados Unidos, Canadá e Grã-Bretanha (GUSSEISEN, 2007). O ferro fundido nodular é caracterizado por apresentar o carbono na forma de esferóides, distribuídos na matriz metálica. Utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV) é possível observar em detalhes a forma esférica da partícula de um esferóide de grafita sem conexão com a matriz metálica, porque foi profundamente atacada com HCl 50%, conforme evidenciado na Figura 2(a) e 2(b) (RADZIKOWSKA, 2004).

Figura 2: Amostra de ferro fundido nodular analisado em MEV.

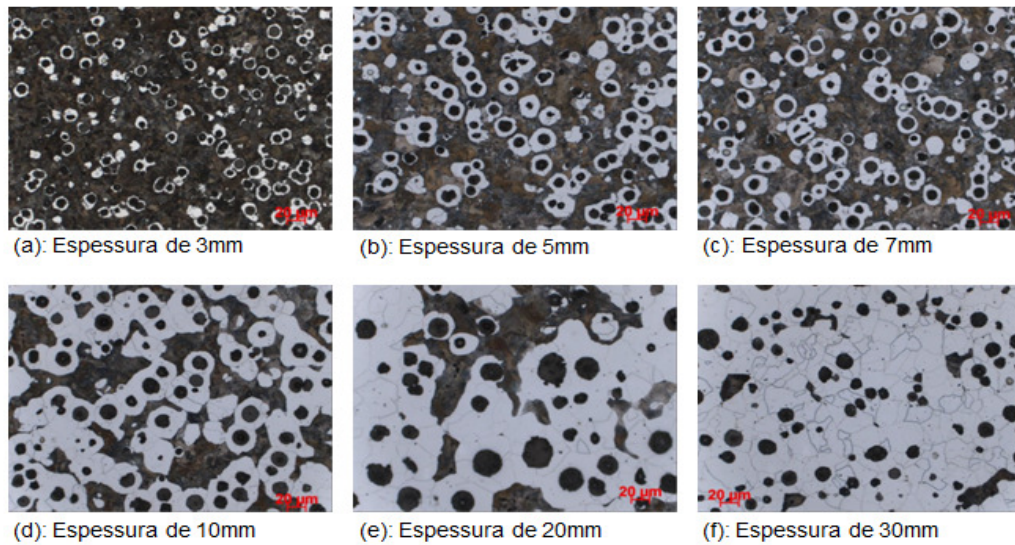


(a) Ferro dúctil polido, (b) Grafita esferoidal examinada com MEV.

Fonte: Radzikowska (2004).

O estudo desenvolvido por Kamińska et al. (2018) mostra a influência da velocidade de resfriamento na microestrutura utilizando placas com diferentes espessuras de parede, isto é, 3 mm; 5 mm; 7 mm; 10 mm; 20 mm e 30 mm. Conforme demonstrado na Figura 3 (a-b-c-d-e-f), o teor de ferrita (regiões claras) aumenta gradativamente e o teor de perlita (regiões escuras) diminui ao longo da matriz com o aumento da espessura das paredes da placa fundida.

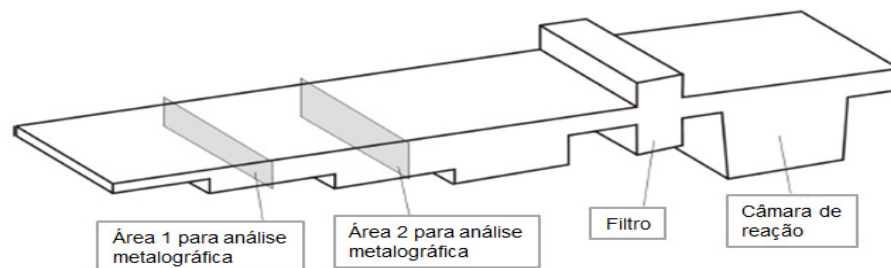
Figura 3: Microestruturas observadas em diferentes espessuras no ferro nodular.



Fonte: Kamińska et al. (2018).

No entanto, para a verificação da micrografia e matriz metálica, alguns autores optam por utilizar corpos de prova escalonados. Stawarz et al. (2017), por exemplo, ao investigar uma série de fenômenos estruturais empregando o processo de nodularização *in mold* para ferros fundidos, conduziu análises metalográficas em diferentes seções de um corpo de prova escalonado, conforme indicado na Figura 4.

Figura 4: Exemplo de corpo de prova escalonado.



Fonte: Adaptado de Stawarz et al. (2017).

3.4 Sequência da solidificação dos ferros fundidos nodulares

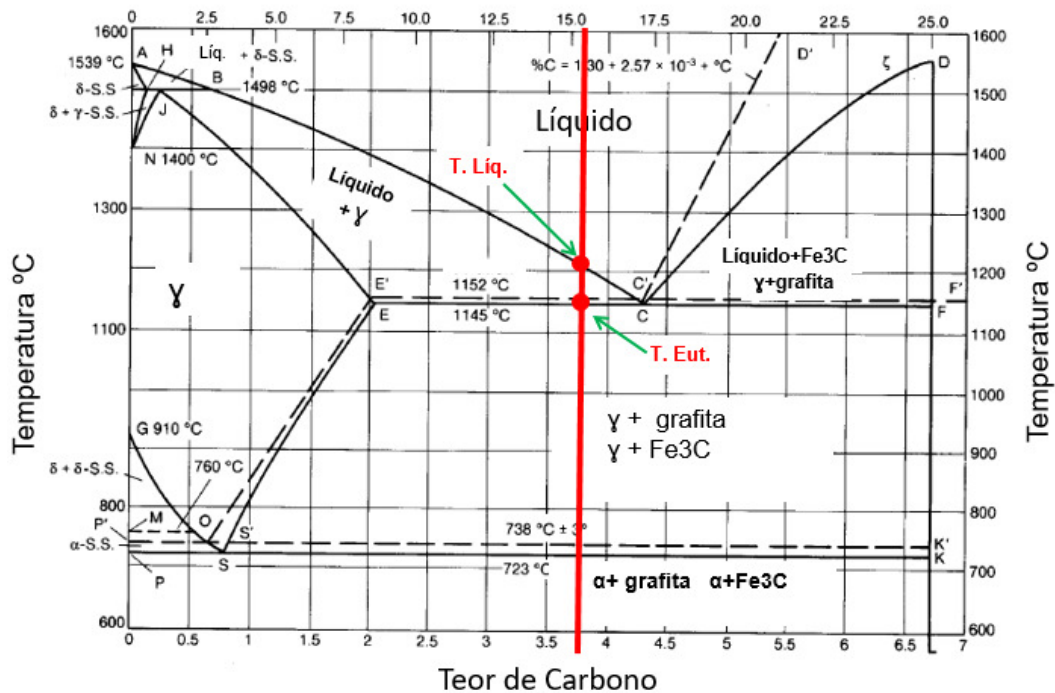
A sequência da solidificação dos ferros fundidos nodulares se dá de maneira distinta de acordo com o tipo de liga fundida: hipoeutética, eutética e hipereutética.

3.4.1 Sequência da solidificação hipoeutética

Dendritas de austenita pobres em carbono no início da solidificação dos ferros fundidos são formadas. Com a redução da temperatura, o líquido residual enriquece de carbono e silício. Fatores como condições de nucleação e de resfriamento são decisivos no tempo e na temperatura para os quais o calor latente de solidificação compensa a quantidade de calor ao meio externo. Esses esferóides de grafita que se formam em meio ao líquido residual são envolvidos pela austenita e crescem até que todo o calor latente de solidificação seja liberado, completando a reação (SANTOS; BRANCO, 1991).

O ferro fundido nodular hipoeutético tem percentual de carbono equivalente menor que 4,3%, valor este que corresponde ao ponto eutético. A solidificação se completa ao atingir a temperatura de transformação eutética estável (Líquido = γ Fe + Cgrafita) ou metaestável (Líquido = γ Fe + Fe₃C). A Figura 5 ilustra o diagrama de fases Fe-C. O traçado da linha vermelha indica o caminho de solidificação de uma liga com o teor de carbono inferior a 4,3%, ou seja, uma liga hipoeutética (ANJOS, 2015).

Figura 5: Diagrama de equilíbrio Fe-C: solidificação de uma liga hipoeutética.

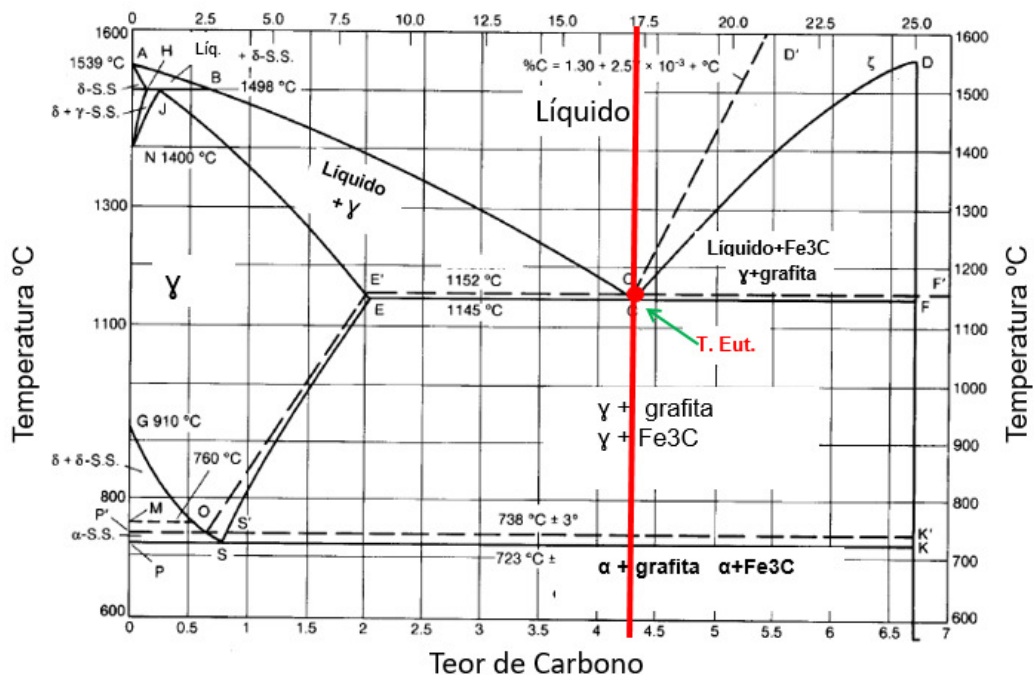


Fonte: Adaptado de Anjos (2015).

3.4.2 Sequência da solidificação eutética

Uma liga eutética é aquela que possui exatamente o mesmo teor de carbono que o ponto eutético, conforme mostra a Figura 6. O traçado da linha vermelha indica o caminho de solidificação de uma liga 100% líquida com o teor de carbono igual a 4,3%. O esferoide de grafita se forma diretamente com o líquido, abaixo da temperatura do eutético.

Figura 6: Diagrama de equilíbrio Fe-C: solidificação de uma liga eutética.



Fonte: Adaptado de Anjos (2015).

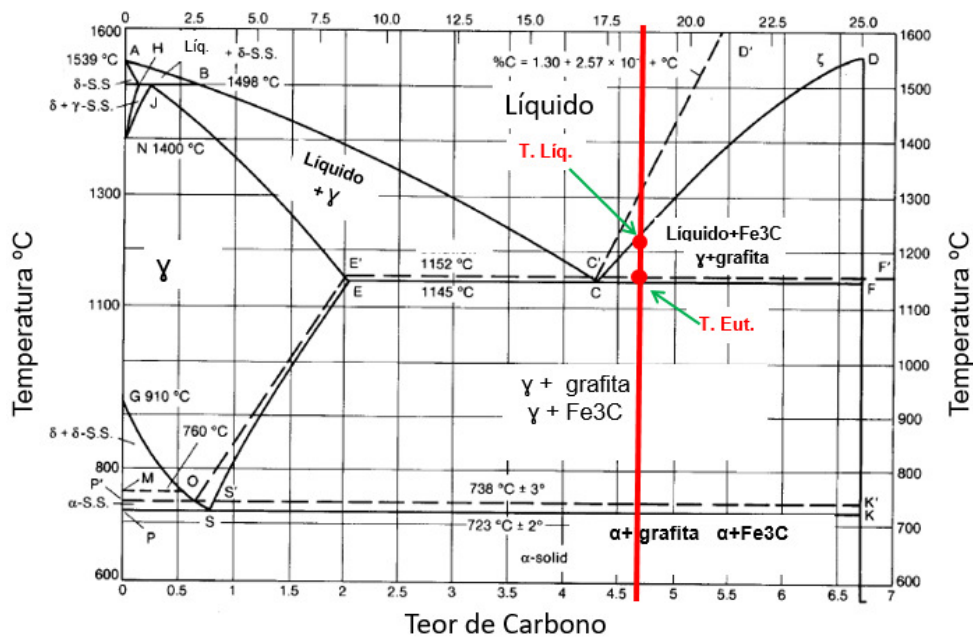
Esta sequência ocorrerá de acordo com a transformação eutética estável (Líquido = γ Fe + Cgrafita) ou metaestável (Líquido = γ Fe + Fe₃C), dependendo das propriedades cinéticas da liga. Nesta sequência de solidificação não existe uma fase principal primária, não ocorrendo nenhuma segregação significativa para o líquido (ANJOS, 2015).

3.4.3 Sequência da solidificação hipereutética

A solidificação inicia-se com a formação de grafita primária. À medida que a temperatura diminui, abaixo da linha líquidus, a composição da grafita esferoidal se aproxima da eutética. Após um super-resfriamento, estes esferóides de grafita

crecem e depois são envolvidos pela austenita (SANTOS; BRANCO, 1991). O teor de carbono é superior ao ponto eutético e apresenta duas linhas líquidas, sendo que, a contínua representa a solidificação metaestável e a descontínua a solidificação estável conforme apresentado na Figura 7. O traçado da linha vermelha indica o caminho de solidificação de uma liga 100% líquida com o teor de carbono superior a 4,3%, ou seja, uma liga hipereutética. Dependendo das propriedades metalúrgicas, inoculação e taxas de resfriamento, a solidificação seguirá apenas uma dessas duas linhas do líquido, e não as duas simultaneamente. A solidificação ocorrerá de acordo com a transformação eutética estável (Líquido = γ Fe + Cgrafita) ou metaestável (Líquido = γ Fe + Fe₃C), dependendo das propriedades cinéticas do fundido (ANJOS, 2015).

Figura 7: Diagrama de equilíbrio Fe-C: solidificação de uma liga hipereutética.



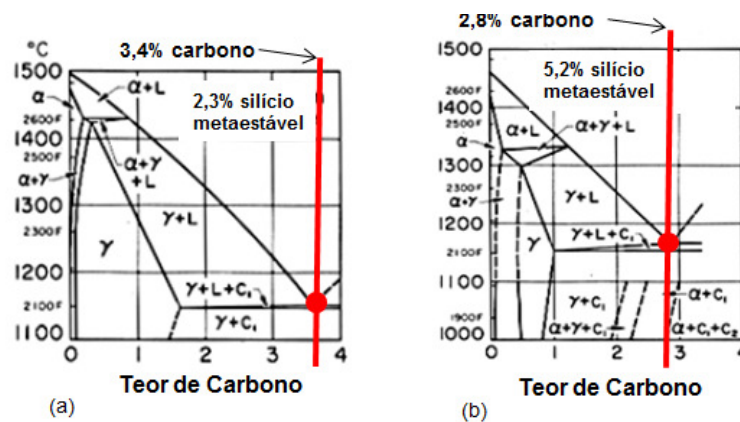
Fonte: Adaptado de Anjos (2015).

3.4.4 Influência do silício no diagrama de fases Fe-C

A presença de silício no ferro fundido causa alterações no diagrama de equilíbrio Fe-C e torna necessário considerar um diagrama de fase ternário de Fe-C-Si. A redução do teor de carbono no ponto eutético é uma das principais mudanças causadas pelo silício. A Figura 8 mostra que, à medida que o conteúdo de silício

aumenta, ocorre deslocamento do eutético no sentido do campo da austenita (move-se para a esquerda). Esse movimento causa também uma redução da área do campo de austenita (γ) no diagrama. Isso significa que, à medida que o teor de silício no ferro fundido aumenta, a solubilidade do carbono na austenita diminui. Para uma liga Fe-C-Si contendo 2,3% de silício, o eutético se encontra a aproximadamente 3,4% de carbono, conforme figura 9 (a), e para uma liga com 5,2% de silício o eutético se fixa próximo a 2,8% de carbono, conforme figura 9 (b) (ASM HANDBOOK, 2008).

Figura 8: Influência do teor de silício nas temperaturas do diagrama de equilíbrio Fe-C.



Teores de silício de (a) 2,3% e (b) 5,2%

Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (2008).

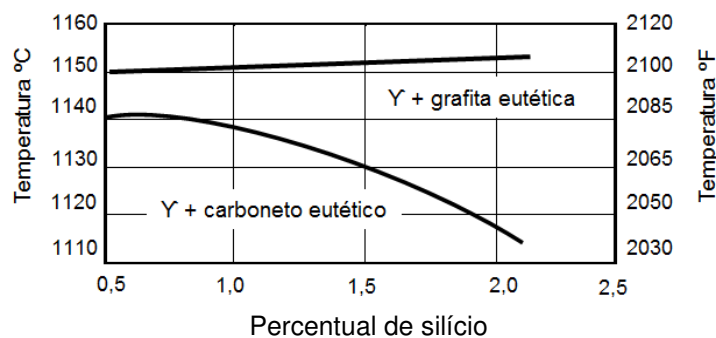
Devido à influência do silício no ponto eutético e no percentual de carbono do diagrama de fases Fe-C, foi definida uma variável denominada carbono equivalente. A expressão do carbono equivalente não considera somente a quantidade dos elementos químicos presentes no material, mas também o poder grafitizante de cada um deles (SANTOS; BRANCO, 1991).

O carbono equivalente representa um conteúdo de carbono fictício no diagrama de fases Fe-C, considerando que a presença de silício no ferro fundido nodular atua como se fosse carbono. No eixo X do diagrama de equilíbrio Fe-C, o carbono equivalente deve ser considerado, e não o conteúdo original de carbono, com o objetivo de se determinar se o ferro fundido é hipoeutético, eutético ou hipereutético. Considera-se que o ponto eutético tem um valor de carbono equivalente de 4,3%. O cálculo simplificado dos valores de carbono equivalente é apresentado na Equação (1) (BEX, 1991). Nesse caso, o percentual de fósforo também é incluído na equação de maneira semelhante à influência do silício.

$$CE = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \quad (\text{Equação 1})$$

Outra mudança no diagrama de equilíbrio Fe-C com a presença do silício é o deslocamento das curvas de temperaturas eutéticas estáveis e metaestáveis do diagrama de equilíbrio ferro-carbono (Fe-C). O acréscimo de silício provoca aumento da temperatura eutética estável (Líquido = γ Fe + Cgrafita) e redução na temperatura eutética metaestável (Líquido = γ Fe + Fe₃C). O resultado final será um intervalo maior entre essas duas temperaturas conforme ilustrado no Gráfico 2 (ASM HANDBOOK, 2008).

Gráfico 2: Influência do silício no diagrama de fases Fe-C nas temperaturas eutéticas estáveis e metaestáveis.



Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (2008).

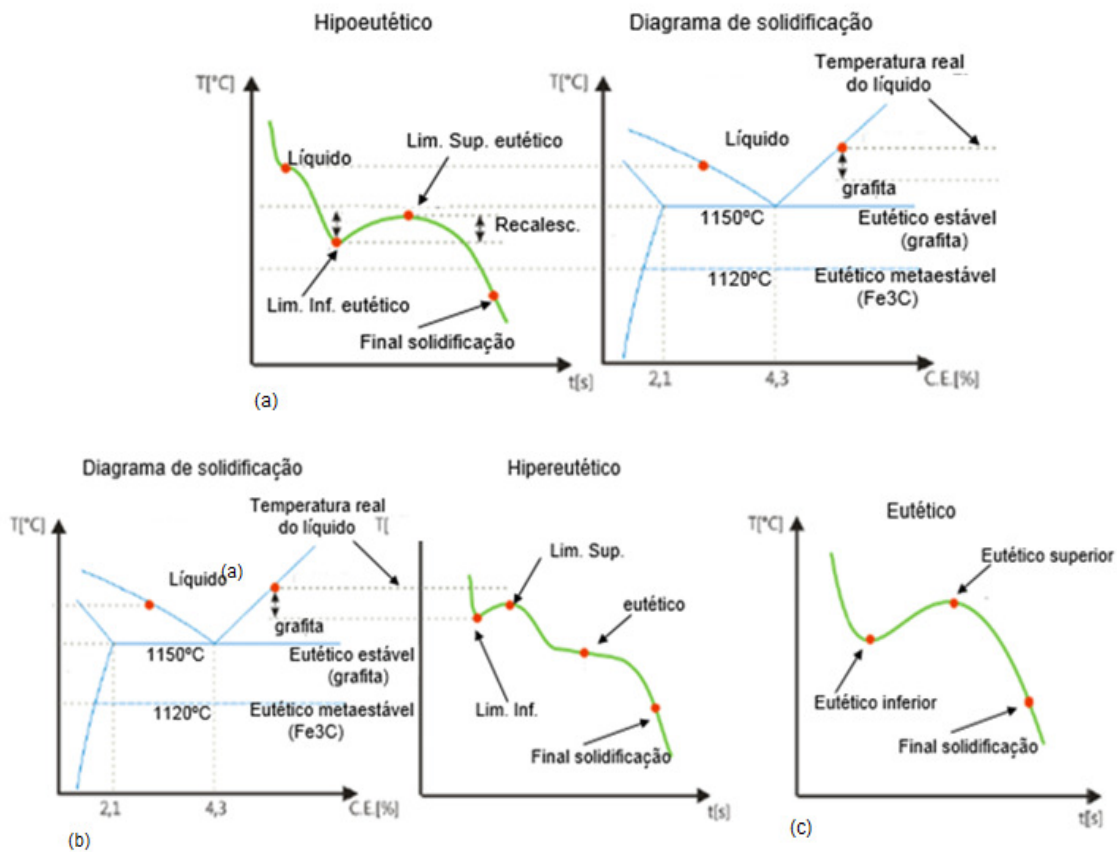
3.4.5 Morfologia da solidificação com amostras para análise térmica

Recentes melhorias tecnológicas em sistemas computacionais e equipamentos de medição de temperatura foram observados, possibilitando alcançar resultados detalhados e precisos das curvas de solidificação. Um volume de amostra para análise térmica pode ser investigado por meio da sequência dos diferentes platôs de uma curva de resfriamento seguindo a versão estável do diagrama de solidificação para ferros fundidos nodulares (ANJOS et al. 2014).

As curvas de solidificação de uma liga hipoeutética apresentam dois platôs, conforme representado na Figura 9(a). O primeiro é identificado como a temperatura liquidus com recalescência máxima de 2°C e que ocorre no máximo em 4 segundos. A medida que a temperatura diminui, um segundo platô é formado com recalescência maior que o primeiro em tempo e temperatura, correspondendo à transformação

eutética. Após esta etapa, ocorre resfriamento e a solidificação se completa (BAUMGART, 2013).

Figura 9: Curvas de solidificação e classificação sugerida para morfologias de solidificação hipoeutética, hipereutética e eutética.



a) hipoeutético, (b) hipereutético, (c) eutético

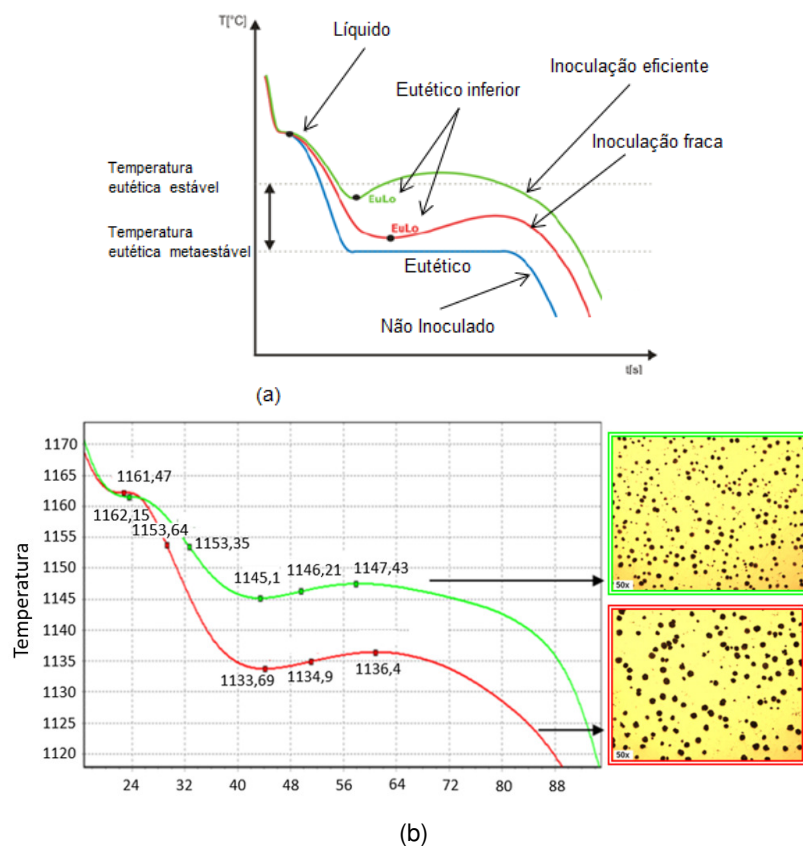
Fonte: Adaptado de Anjos et al. (2014).

3.5 Tratamento de inoculação dos ferros fundidos nodulares

O tratamento de inoculação é uma etapa do processo na fabricação do ferro fundido nodular que consiste em adicionar ligas ao metal líquido a base de ferro silício, contendo também cálcio, estrôncio, bário e cério para promover a formação de grafita na solidificação e evitar a tendência ao coquilhamento (BAUMGART et al. 2010; SANTOS; BRANCO, 1991). Nessa fase, a análise térmica é utilizada para avaliar a eficiência da inoculação no ferro nodular. Pela análise da curva de resfriamento no platô eutético, é possível investigar a qualidade da inoculação em uma determinada fusão, de acordo com os princípios da nucleação heterogênea. Inocular o metal líquido

reduz a quantidade de energia necessária para iniciar a nucleação e, nessa situação, a magnitude do super-resfriamento é avaliada pela precipitação da grafita em ferros fundidos eutéticos e hipoeutéticos (BAUMGART et al. 2010). Na Figura 10(a) são mostradas 3 curvas de resfriamento representando um metal inoculado (curva verde), inoculação fraca (curva vermelha) e não inoculação (curva azul). A curva não inoculada é característica de temperatura eutética metaestável sem recalescência. Com a adição do inoculante, observa-se a recalescência devido ao calor latente de solidificação do crescimento e nucleação da grafita atingindo a temperatura eutética estável. A Figura 10(b) mostra duas amostras de análise térmica obtidas de uma mesma fusão de ferro nodular com inoculantes diferentes, resultando em microestruturas distintas: a curva com maior eficiência de inoculação apresenta microestrutura com maior densidade de partículas de grafita do que aquela com menor potencial de inoculação (BAUMGART et al. 2010).

Figura 10: Curvas de amostras de análise térmica com inoculantes distintos.



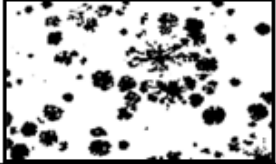
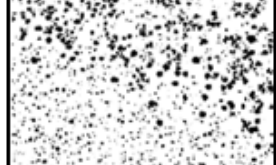
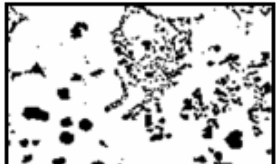
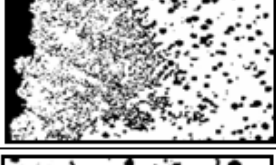
(a) Ilustração da influência da inoculação por fusão nas curvas de resfriamento; (b) exibição da curva de resfriamento real, mostrando a diferença entre uma curva com inoculação fraca (curva vermelha) e inoculação eficiente (curva verde) e respectivas micrografias

Fonte: Adaptado de Baumgart et al. (2010).

3.6 Principais tipos de processos de nodularização dos ferros fundidos

O Quadro 6 apresenta um resumo dos desvios de microestrutura se a técnica do processamento de nodularização não for bem estudada e elaborada (RIPOSAN et al. 2008).

Quadro 6: Tipo e motivos dos desvios das microestruturas de ferro fundido nodular.

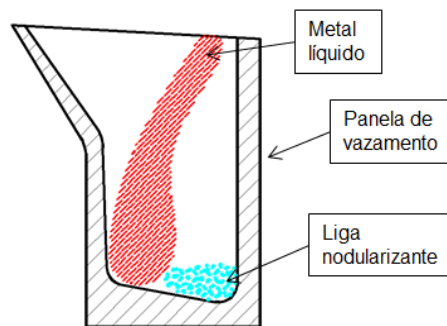
Desvio da microestrutura (grafita)	Causas potenciais	Forma típica
Formação insuficiente de nódulos (grau de nodularização)	- Percentual de magnésio inferior a 0,03% - Carbono equivalente baixo - Tempo longo de espera para iniciar o vazamento nos moldes	
Grafita explodida	- Metal líquido com composição química hipereutética (carbono equivalente > 4,3%) - Teores elevados de magnésio residual no banho de ferro fundido - Tempo longo de solidificação	
Flotação da grafita (acumulação primária dos nódulos separados do banho fundido)	- Metal líquido com composição química hipereutética (carbono equivalente > 4,3%) - Tempos longos de resfriamento e de solidificação	
Grafita chunky (grafita intracelular finamente distribuída em partículas arredondadas)	- Tempo longo de solidificação - Teores de silício, níquel e cálcio elevados	
Grafita intercelular ou intercelular lamelar	- Tempo longo de solidificação - Excesso de antimônio e arsênio	
Grafia lamelar na periferia da peça	- Tempos longos de resfriamento e solidificação - Excesso de enxofre - Excesso de oxidação do magnésio	
Grafita no formato irregular	- Tempo longo de espera para iniciar o vazamento dos moldes - Inoculação insuficiente - Presença de elementos que degeneram a grafita	

Fonte: Riposan et al. (2008).

3.6.1 Simples transferência

No processo por simples transferência, a liga nodularizante é colocada do lado oposto da panela que recebe o metal do forno, retardando o início da reação entre a liga e o banho metálico, conforme apresentado na Figura 11 (GHOSH, 2008). A liga comumente utilizada é ferro-silício-magnésio (Fe-Si-Mg). O processo é simples, mas apresenta baixo rendimento do magnésio, de 20% a 25%, e efeito pirotécnico intenso em consequência da reação entre o metal líquido e o magnésio (emissão de gases, fumos, explosões e luminosidade) (BEX, 1991).

Figura 11: Simples transferência.

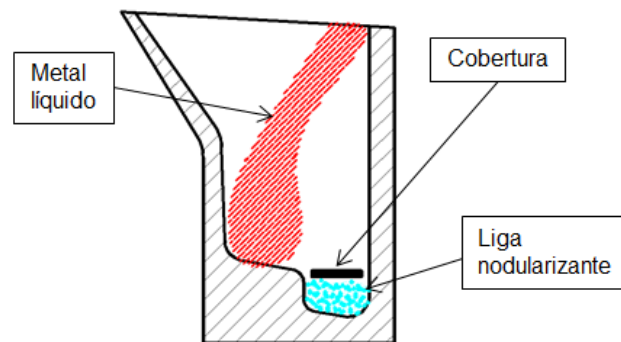


Fonte: Adaptado de Hansen et al. (2014).

3.6.2 Sandwich

O processo *sandwich* é uma técnica dotada de uma panela com uma cavidade no fundo, conforme ilustrado na Figura 12. A liga nodularizante é depositada nessa cavidade, que é coberta com pequenas chapas de aço ou cavacos oriundos da usinagem de ferro fundido. O objetivo da cobertura é retardar a reação do metal líquido com a liga, reduzindo as perdas de magnésio por oxidação e vaporização (HANSEN et al. 2014). Outro fator que favorece o aumento do rendimento do magnésio na operação é que a região de cobertura se comporta como um resfriador, reduzindo a temperatura do metal líquido nesse local (SKALAND, 2003). O motivo para o emprego deste processo é a simplicidade do tratamento e o baixo custo porém, apresenta desvantagens como rendimento do magnésio reduzido, situando de 40 a 45% (GHOSH, 2008), e problemas ambientais devido à grande quantidade de óxidos e fumos formados. É recomendado para ligas nodularizantes contendo menos de 10% de magnésio (BROWN, 2000).

Figura 12: Sandwich.

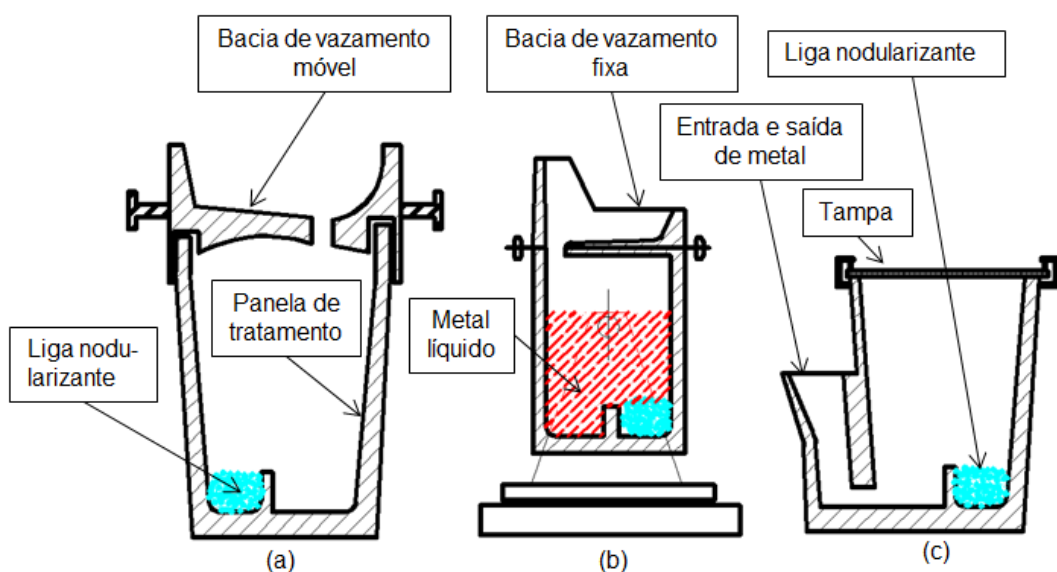


Fonte: Adaptado de Silva (2005).

3.6.3 Tundish cover

O princípio de funcionamento do processo *tundish cover* baseia-se em uma panela com tampa de orifício afunilado, podendo ser fixa ou móvel, como mostrado na Figura 13, limitando o volume de ar em contato com o metal líquido dentro da panela (ANJOS, 2015). O rendimento de magnésio varia de 60% a 70% (HANSEN et al. 2014). A panela dotada com tampa diminui a quantidade de fumos de magnésio e o efeito pirotécnico da reação, reduzindo problemas ambientais e proporcionando acréscimo no rendimento do magnésio (CABANNE, 2006).

Figura 13:Tundish cover.



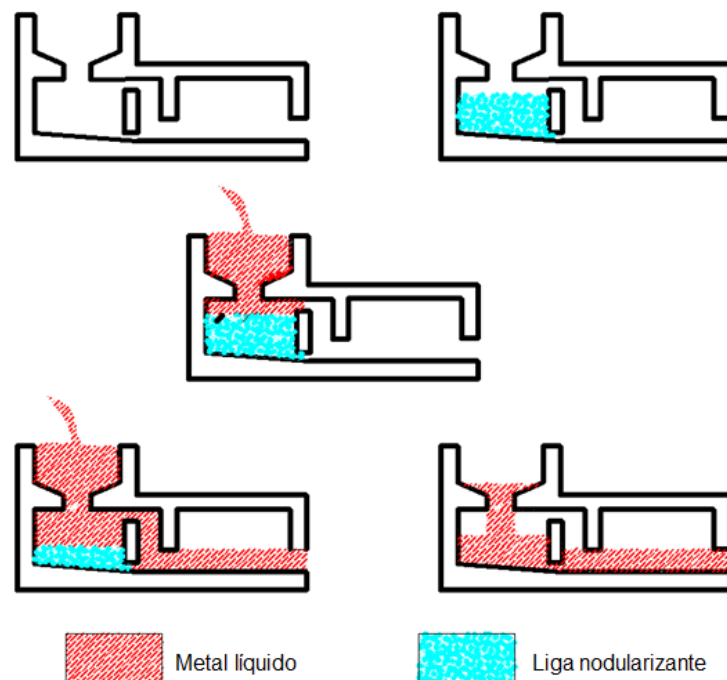
(a) panela com tampa móvel, (b) panela com tampa fixa, (c) panela com bico de chaleira.

Fonte: Adaptado de Hansen et al. (2014).

3.6.4 Tratamento no fluxo de metal – flotret

O tratamento foi desenvolvido com o objetivo de utilizar um reator para nodularização no fluxo de metal externo ao molde. A liga nodularizante é colocada em uma câmara no reator que funciona de forma contínua, como apresentado na Figura 14 (HEINE,1987). As áreas de entrada e saída do fluxo de metal da câmara devem ter um controle apurado para favorecer uma perfeita dissolução da liga (BARTON, 1987; (DUNKS & RACE,1981). A vantagem é que a operação pode atingir rendimentos de magnésio na ordem de 55% a 70% (BEX, 1991).

Figura 14: Tratamento no fluxo de metal – Flotret.



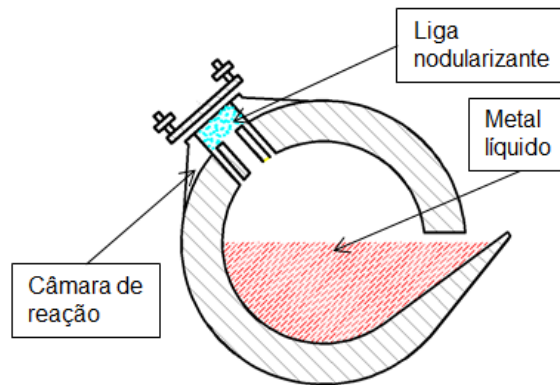
Fonte: Adaptado de Bex (1991).

3.6.5 Panela rotativa

O processo de panela rotativa possibilita a utilização de ligas nodularizantes de baixo peso específico como, por exemplo, o coque impregnado de magnésio. Um reator cilíndrico é utilizado com uma capacidade de 500 kg a 3 toneladas, que gira em torno do seu próprio eixo, conforme ilustrado na Figura 15 (BRYANT, 1978). Com o giro do reator aproximadamente a 120 graus, o metal líquido entra em contato com a

liga nodularizante até que a câmara volte a sua posição inicial (BRYANT, 1978). Obtêm-se percentual de rendimento de magnésio de 45% a 50% (BARTON, 1979).

Figura 15: Panela rotativa.

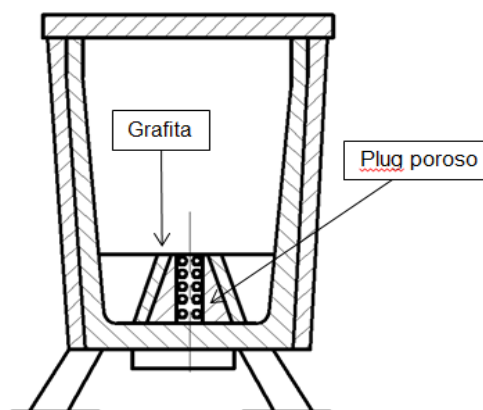


Fonte: Adaptado de Brayant (1978).

3.6.6 Plug poroso

O processo permite a adaptação de uma panela, conforme ilustrado na Figura 16, que apresenta na parte inferior um *plug* poroso de refratário (SANTOS; BRANCO, 1991). Injeta-se nitrogênio para agitar o banho, realizando o processo de dessulfuração, no qual o agente dessulfurante empregado é o carbetto de cálcio (CaC_2) (BROWN, 2000). A escória é retirada após a dessulfuração e quando é reiniciada a injeção de nitrogênio, adiciona-se a liga nodularizante na superfície do banho metálico. O rendimento de magnésio é próximo de 50% (GHOSH, 2008).

Figura 16: Plug poroso.

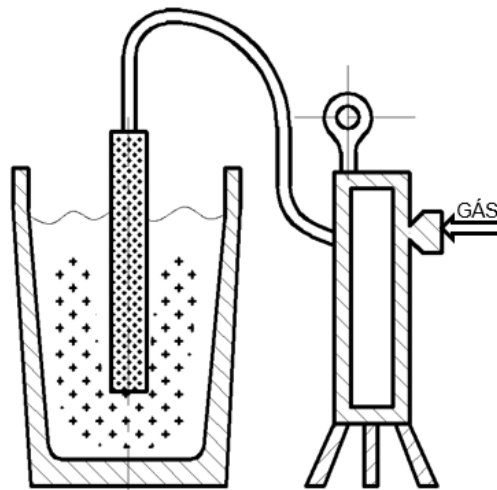


Fonte: Adaptado de Santos; Branco (1991).

3.6.7 Injeção

A técnica de injeção foi desenvolvida com o objetivo de introduzir a liga nodularizante no metal líquido através de correntes de gás inerte, como mostrado na Figura 17. O equipamento utilizado para transportar a liga nodularizante é uma espécie de lança de grafita dotada de orifícios que é mergulhada no metal líquido. O rendimento de magnésio atinge aproximadamente 50% (GHOSH, 2008). Nesse caso, os tratamentos de nodularização e dessulfuração podem ser realizados simultaneamente (HANSEN et al. 2014).

Figura 17: Injeção.

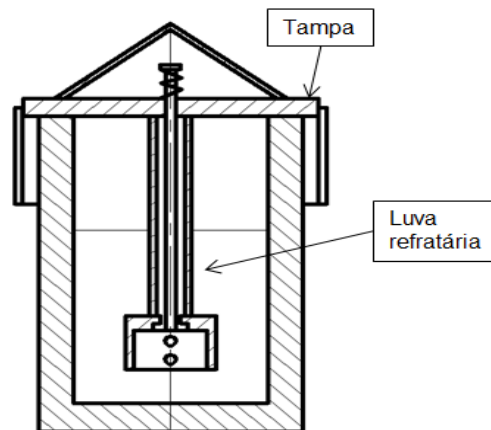


Fonte: Adaptado de Ghosh (2008).

3.6.8 Imersão por sino

O processo de imersão por sino apresenta metodologia dotada de uma panela com uma tampa na parte superior de ferro fundido e um sino de aço com vários orifícios, revestido com material refratário de grafite que contém a liga nodularizante, como pode ser observado na Figura 18. A tampa da panela além de fixar o sino, também tem a função de evitar a projeção de metal para fora da panela. Utiliza-se essa operação em ligas com alto teor de magnésio (SANTOS; BRANCO, 1991). A reação de nodularização ocorre quando o sino é submerso no banho líquido livre de contato com as paredes do refratário da panela. Este processo permite a utilização de ferro fundido com maior teor de enxofre (BARTON, 1975) e rendimento do magnésio superior a 50% (MATTER, 1975).

Figura 18: Imersão por sino.

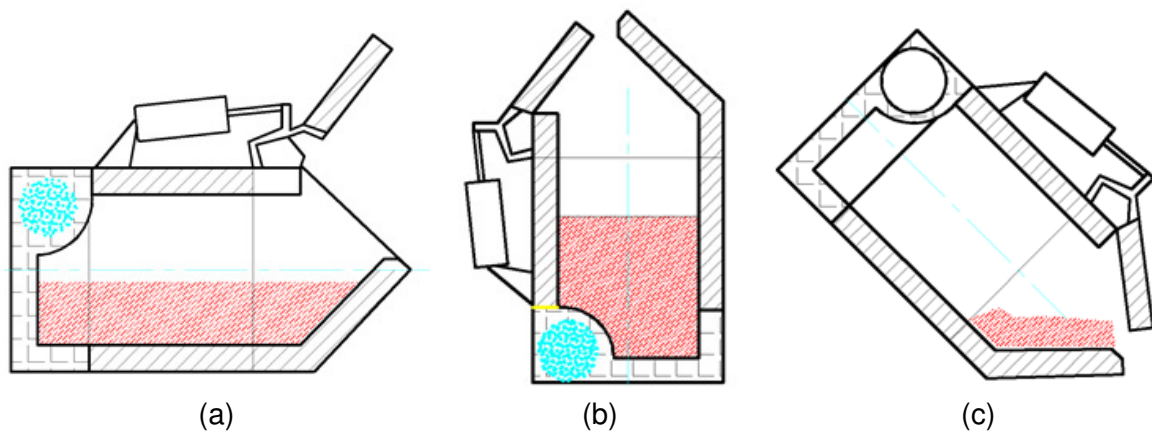


Fonte: Adaptado de Barton (1975); Santos; Branco (1991).

3.6.9 Conversor Georg Fischer

Este método apresenta um conversor desenvolvido pela *Georg Fischer* (reator cilíndrico horizontal) com uma câmara de reação refratária composta de orifícios situada na extremidade oposta à bica do reator, que sofre movimento de rotação de quase 180° em torno do eixo horizontal. Uma representação da operação é mostrada na Figura 19 (BROWN, 2000). Após o preenchimento do reator com metal líquido, ele é fechado e efetua-se a rotação de 90° para iniciar a reação do metal com a liga nodularizante (BROWN, 2000). Com esta técnica é possível obter de 45% a 50% de rendimento de magnésio (FINARDI, 1984).

Figura 19: Conversor Georg Fischer.



(a) enchimento, (b) tratamento, (c) vazamento

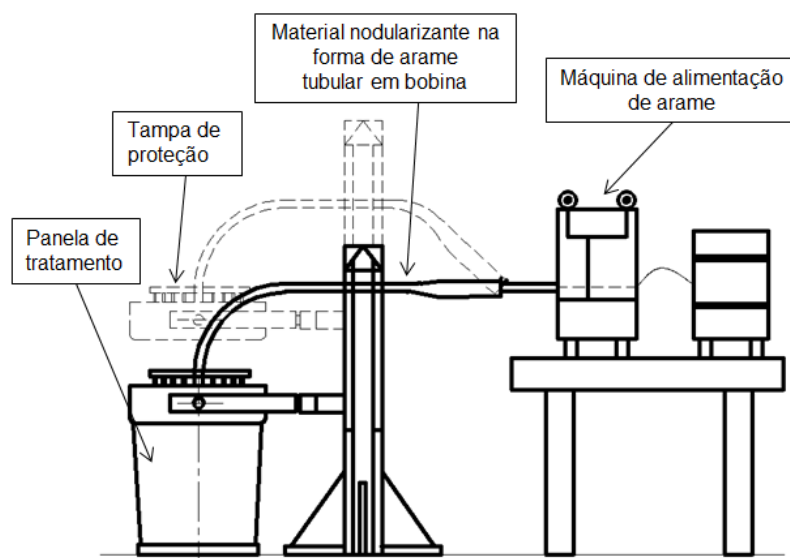
Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (2008).

3.6.10 Arame contendo magnésio

Esta tecnologia de tratamento utiliza-se de um arame tubular contendo a liga nodularizante. Esse arame é introduzido no metal líquido para realizar o tratamento de nodularização, conforme a representação mostrada na Figura 20. Uma vez determinados o peso do metal aplicado na panela, a composição química do ferro fundido base e o teor de magnésio residual desejado, calcula-se o comprimento e a velocidade do arame tubular a ser mergulhado no metal líquido na panela (BROWN, 2000).

O processo é bem controlado em relação à questão de poluição ambiental, pois são empregadas cabines fechadas de tratamento. Com o processo por arame é possível obter de 40% a 60% de rendimento de magnésio (CABANNE, 2006).

Figura 20: Arame contendo magnésio – arranjo básico.



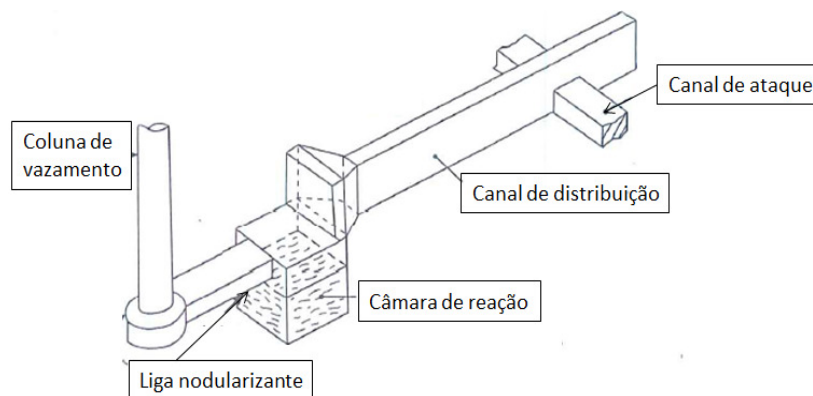
Fonte: Adaptado de Cabanne (2006); Brown (2000).

3.6.11 Nodularização *in mold*

O método de nodularização *in mold* consiste em adicionar uma proporção de liga nodularizante no molde por meio de uma câmara de reação junto ao sistema de canais. À medida que o metal líquido flui pelos canais, este entra em contato com a liga nodularizante promovendo sua reação. Após a reação na câmara, o metal tratado segue o fluxo pelas cavidades dos canais e peças, conforme apresentado na Figura

21. No processo *in mold* o tempo de *fading* é inexistente, ou seja, a perda do efeito da liga nodularizante é desprezível devido ao curto tempo entre a solidificação do metal líquido e o tempo de reação da liga nodularizante. Através deste processo, pode-se atingir rendimentos de magnésio superiores a 80% (COSTA, 1995), podendo chegar a 100% (GHOSH, 2008).

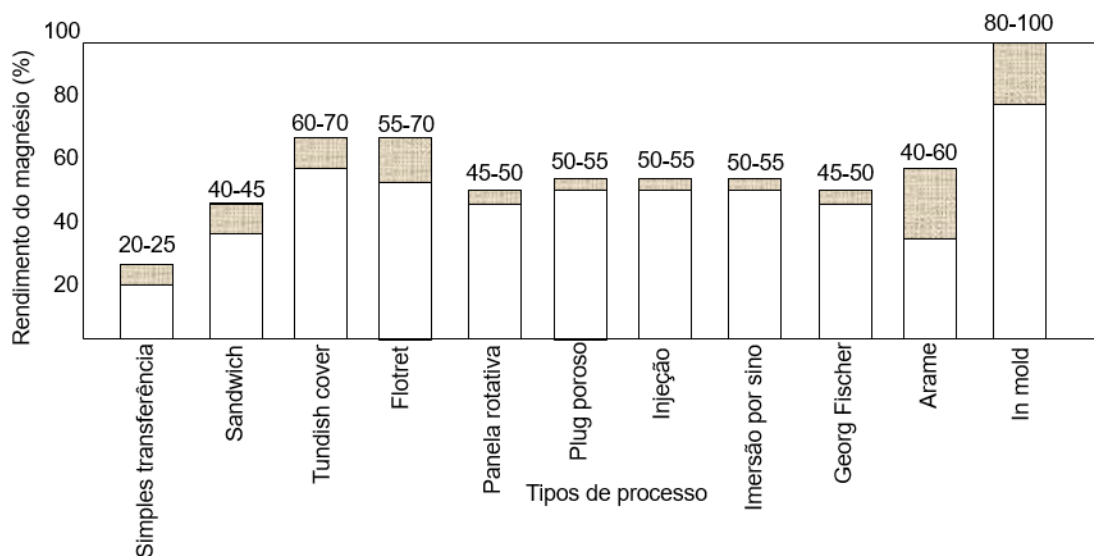
Figura 21: Nodularização *in mold*.



Fonte: Adaptado de Brown (2000).

No Gráfico 3 pode ser observada uma comparação do rendimento de magnésio dos processos de nodularização apresentados. Nota-se que o processo de nodularização *in mold* é aquele que, a princípio, exibe um desempenho superior aos demais nesse quesito.

Gráfico 3: Comparativo entre os processos considerando o rendimento do magnésio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.7 Particularidades da obtenção de ferro nodular através do processo *in mold*

3.7.1 Características gerais do processo

O processo *in mold* apresenta vantagens em relação aos demais métodos, conforme demonstrado no Quadro 7, e algumas desvantagens ou limitações de uso, citadas no Quadro 8.

Quadro 7: Principais vantagens apresentadas pelo processo *in mold*.

Principais vantagens apresentadas pelo processo <i>in mold</i>
O rendimento do magnésio pode atingir até 100% (GHOSH, 2008).
Como a câmara de reação está posicionada próximo a cavidade da peça, o tempo de reação da liga e a solidificação do metal é muito curto, favorecendo um excelente efeito de nucleação e nodularização, tornando inexistente o tempo de <i>fading</i> (COSTA, 1995).
Como o processo apresenta um elevado rendimento do magnésio, que pode ser superior a 80%, pode-se prever a redução da liga nodularizante, o que torna o processo viável economicamente (JUST; PACYNIK, 2012).
A formação de gases é atenuada e a parte pirotécnica (explosões características da reação do magnésio durante o contato com o ferro base), inexistente nesse processo, pois a reação ocorre dentro do molde (JUST; PACYNIK, 2012).
Em razão da liga nodularizante ser colocada no molde, o processo de operação oferece maior segurança para o operador (MANNION, 1973).
Devido ao elevado rendimento do magnésio, reduz-se a tendência à formação de carbonetos em seções finas, eliminando a necessidade de uso de inoculante adicional (COSTA, 1995).
Evita a utilização de painéis especiais de tratamento (MANNION, 1973).
Em fundições de alta produtividade que utilizam sistemas automáticos é possível seu emprego (PILASTRO, 1976).
O processo é considerado ecológico, favorável ao meio ambiente, pois a reação ocorre dentro do molde (DUCTILE IRON HANDBOOK, 1992).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 8: Desvantagens ou limitações de uso apresentadas pelo processo *in mold*.

Desvantagens ou limitações de uso apresentadas pelo processo <i>in mold</i>
Refugo alto de peças para permitir o ajuste do processo, o que torna inviável para produções não seriadas (COSTA, 1995; DUCTILE IRON HANDBOOK, 1992).
Deve-se controlar o percentual de enxofre (menores que 0,010%) para evitar a presença de inclusões de óxidos e sulfetos (DUCTILE IRON HANDBOOK, 1992).
Como o metal líquido absorve grande quantidade de magnésio, pode ocorrer heterogeneidade de magnésio residual na mesma peça, comprometendo a microestrutura (MOORE, 1973).
Menor rendimento metalúrgico devido à câmara de reação pertencer aos canais de vazamento (DUCTILE IRON HANDBOOK, 1992).
Limitações de fabricação de peças de peso elevado, pois necessita de uma câmara de reação profunda, o que poderia comprometer a reação (PILASTRO, 1976).
Produção de grande quantidade de escória causada pela reação da liga na cavidade do molde (BROWN, 2000).

Fonte: Elaborado pelo autor.

A liga nodularizante é pesada em relação à quantidade de metal a ser tratado. A qualidade dessa liga depende das dimensões da câmara de reação e de todo o sistema de canais, requerendo uma sintonia entre o tempo de enchimento e o tempo de dissolução da liga. O rendimento metalúrgico tende a ser menor devido à inclusão da câmara de reação ao sistema de canais (DUCTILE IRON HANDBOOK, 1992).

3.7.2 Elaboração do ferro fundido base

Não há alterações na elaboração do ferro fundido base no processo *in mold* em relação às outras operações de nodularização, mas para garantir uma quantidade mínima de liga nodularizante a ser utilizada deve-se controlar o teor de enxofre, que deve ser inferior a 0,010%. Um teor acima desse valor pode comprometer a nodularização (COSTA, 1995).

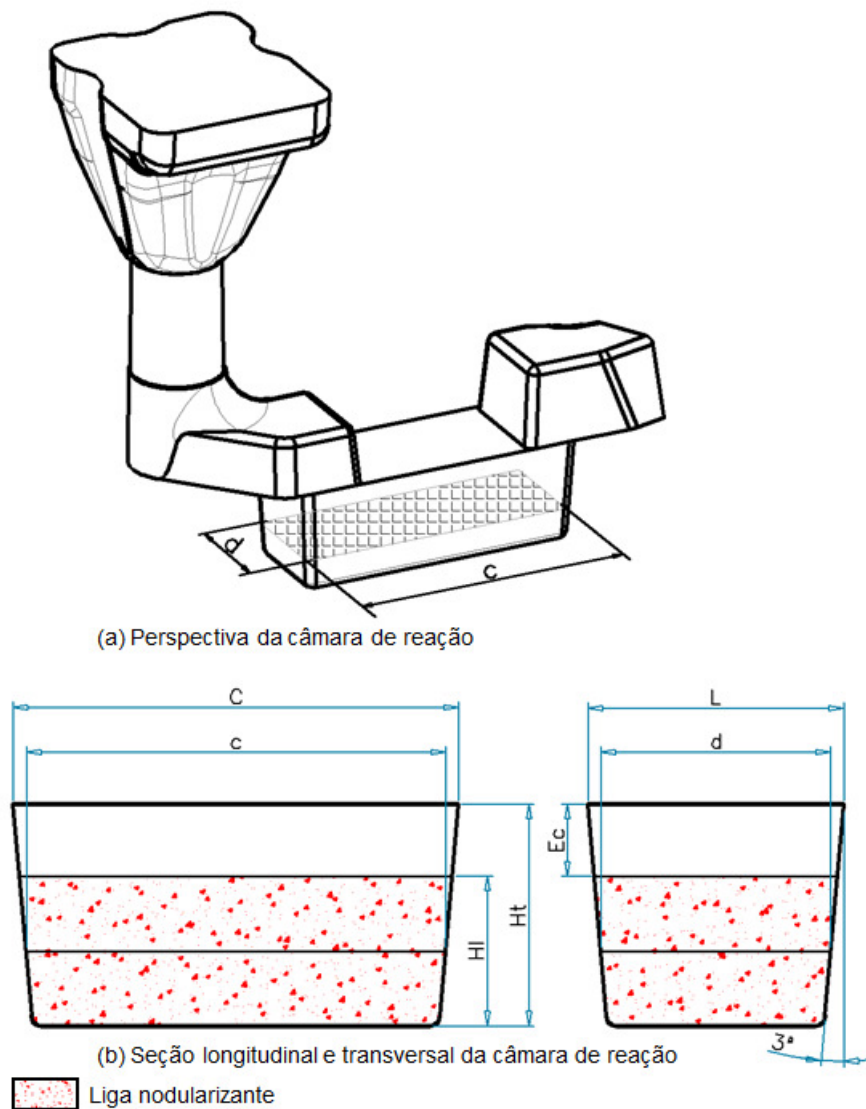
O controle da temperatura de sobreaquecimento no forno e da temperatura de vazamento, no que se refere à qualidade da peça fundida, é essencial na produção de qualquer peça em ferro fundido nodular. Verifica-se ainda que esta condição é aplicada com maior rigor para o processo de nodularização em molde. Neste caso, a temperatura do ferro base no forno deve atingir aproximadamente 1480°C e a temperatura de vazamento deve manter-se entre 1380°C a 1450°C, dependendo da espessura da peça a ser vazada (CASTLEDINE, 1979) e (COSTA, 1995).

3.7.3 Dimensionamento da câmara de reação

O primeiro fator a ser considerado para o dimensionamento da câmara de reação é o cálculo da sua área longitudinal (multiplicação das dimensões “c” e “d”), conforme Figura 22 (a).

A área média da câmara de reação é um dos principais fatores para garantir uma perfeita reação da liga nodularizante. A precisão do cálculo é que determina a velocidade ideal para proporcionar a dissolução da liga de magnésio. Para o dimensionamento da câmara de reação, alguns fatores devem ser considerados conforme demonstrado na Figura 22 (b) e nas Equações de (2) a (8) (COSTA, 1995).

Figura 22: Área da seção longitudinal da câmara de reação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A área da seção longitudinal da câmara de reação representada pela letra “A”, corresponde exatamente à metade da altura que recebe a liga nodularizante, conforme demonstrado na Figura 22 (b). O cálculo se dá conforme Equação (2): fator “F”, que representa a quantidade de metal a ser tratado (peso de todo o metal líquido que preenche a cavidade do molde exceto o peso da coluna de vazamento e das câmaras de reação) dividido por “t” (tempo de enchimento para preenchimento dos moldes), dividido por “n” (quantidade de câmaras de reação no molde), dividido por “k” (coeficiente de dissolução da liga que é calculado conforme o gráfico 5 que considera a relação entre magnésio residual e o fator de dissolução da liga). O resultado dessa equação é expresso em cm^2 .

$$A = \frac{\frac{F}{t}}{\frac{n}{k}} \quad (\text{Equação 2})$$

A proporção de liga nodularizante representado por “Q” é calculada conforme demonstrada na Equação (3): fator “F”, multiplicado por “La” que é o percentual de liga considerado, dividido por 100 e dividido por “n”. O resultado dessa equação é expresso em quilos.

$$Q = \frac{\frac{F \times La}{100}}{n} \quad (\text{Equação 3})$$

A dimensão “Hl” se refere à altura ocupada pela liga nodularizante. Multiplica-se a proporção de liga “Q” por 1000 e divide-se pelo produto da área longitudinal pela densidade da liga nodularizante, conforme demonstrado na Equação (4).

$$Hl = \frac{Q \times 1000}{A \times dl} \quad (\text{Equação 4})$$

A largura da seção da área média “d”, expresso em centímetros, é calculada conforme Equação (5): largura no plano de divisão “L” menos a tangente do ângulo de saída da câmara de reação, neste exemplo representado por 3º, multiplicado pela soma de Hl dividido por 2 e o “Ec” (região de extra-câmara “vazio entre a liga nodularizante e o molde superior”), multiplicado por dois.

$$d = L - \{[\tan 3^\circ \times (\frac{Hl}{2} + Ec)] \times 2\} \quad (\text{Equação 5})$$

Para o cálculo do comprimento da seção da área média “c”, divide-se a área da seção longitudinal pela largura da seção da área média da câmara de reação conforme Equação (6). O resultado é expresso em centímetros.

$$c = \frac{A}{d} \quad (\text{Equação 6})$$

O comprimento no plano de divisão “C” é calculado conforme Equação (7): comprimento “c” mais a tangente do ângulo de saída da câmara de reação, neste exemplo representado por 3º, multiplicado pela soma de HI dividido por 2 e o “Ec multiplicado por dois. O resultado é expresso em centímetros.

$$C = c + \{[\text{tang } 3^\circ \times (\frac{HI}{2} + Ec)] \times 2 \quad (\text{Equação 7})$$

A altura total “Ht” é a soma da região de extra-câmara e o “HI” conforme equação (8), expresso em centímetros.

$$Ht = Ec + HI \quad (\text{Equação 8})$$

Tabela 1: Descrição dos itens das Equações de (2) a (8).

Legenda dos termos das equações		
Fator	Descrição	Unidade
A	Área da região hachurada (área da seção longitudinal da câmara de reação).	Centímetros quadrados
t	Tempo de enchimento	Segundos
K	Coefficiente de dissolução da liga. Calculado pelo gráfico 4 a seguir (Coeficiente de dissolução da liga & Percentual de magnésio residual);	Libras por segundo x square x polegada
Q1	proporção de liga considerado	Quilos
La	Percentual de liga considerado	Percentual
n	Quantidade de câmaras de reação no molde	-
L	Largura da câmara de reação no plano de divisão	Centímetros
C	Comprimento da câmara de reação no plano de divisão	Centímetros
Tang 3º	Ângulo de saída da câmara de reação	Graus
Ec	Região de extra-câmara (vazio correspondente entre a liga nodularizante e o molde superior).	Centímetros
d	Largura da seção da área média da câmara de reação	Centímetros
c	Comprimento da seção da área média da câmara de reação	Centímetros
HI	Altura ocupada pela liga nodularizante na câmara de reação	Centímetros
dl	Densidade da liga nodularizante	Quilos por decímetro cúbico
Ht	Altura total da câmara de reação	Centímetros

Fonte: Elaborado pelo autor.

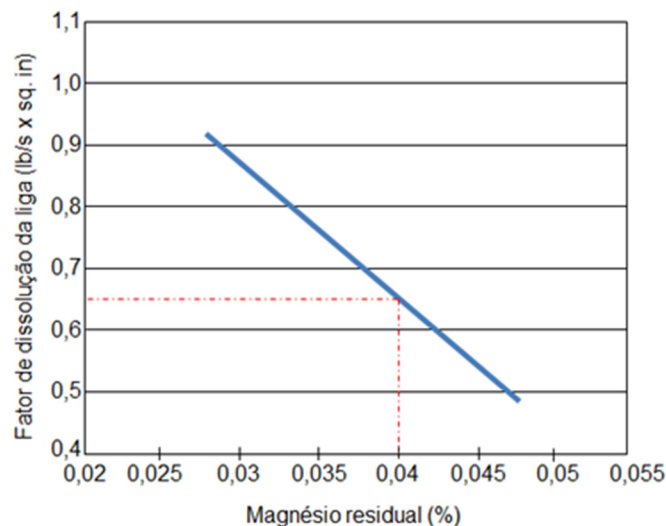
A profundidade da câmara de reação vai depender da proporção de liga nodularizante e da altura do extra-câmara. A determinação do peso do feixe (soma do peso da coluna de vazamento, canal de descida, canais de distribuição, câmaras de

reação, corpos de prova e massalotes) e do tempo de enchimento é realizada baseando-se na vazão do metal (quilos de metal vazado por segundo). Como exemplo da vazão de metal a ser utilizada na operação, pode-se citar: i) para moldes com peso de feixe até 20kg, a vazão máxima deve ser de 2kg/s; ii) para moldes com peso de feixe de 20 a 30kg, a vazão máxima deve ser de 3kg/s (DUNKS et al. 1974).

3.7.4 O fator de dissolução da liga nodularizante

O fator de dissolução da liga depende da quantidade de magnésio residual necessário à peça. No Gráfico 4 é mostrada a relação existente entre o magnésio residual e o fator de dissolução da liga (SILVA, 1998).

Gráfico 4: Relação entre magnésio residual e o fator de dissolução da liga.



Fonte: Adaptado de Silva (1998).

Para um coeficiente de dissolução abaixo do valor determinado, a liga nodularizante dissolve rapidamente, podendo acabar com a liga na câmara de reação antes do término do vazamento, necessitando de áreas da câmara de reação abaixo do determinado para compensar a velocidade de dissolução da liga. Por outro lado, para um coeficiente de dissolução da liga acima do valor calculado, a liga nodularizante dissolve lentamente, ocorrendo a sobra de liga na câmara após o vazamento, necessitando de grandes áreas da câmara para compensar uma menor velocidade de dissolução da liga (SILVA, 1998).

3.7.5 A liga nodularizante

As ligas nodularizantes, sendo a mais comum a base de FeSiMg, devem ter um controle apurado na composição química e na repartição granulométrica. Com relação à proporção de liga na câmara de reação, esse valor pode variar de 0,9% (KAMINSKA et al. 2018) a 1% (PIETROWSKI, 2009). No estudo de Just e Pacyniak (2012) foi utilizado de 0,7% a 1,0% de liga. Cita-se na Tabela 2, como exemplo, a composição química de duas ligas nodularizantes constituídas basicamente de FeSiMg (COSTA, 1995; McCAULAY, 1971).

Tabela 2: Composição química das ligas nodularizantes.

Liga	%Si	%Mg	%Ca	%Al	%Ce	%Cr	%Fe
01	44,00	5,00	0,30	0,60	0,40	-	49,70
02	47,00	7,00	0,50	0,80	0,70	0,05	43,95

Fonte: Costa (1995); Mccaulay (1971).

3.8 Efeito da forma da câmara de reação na microestrutura

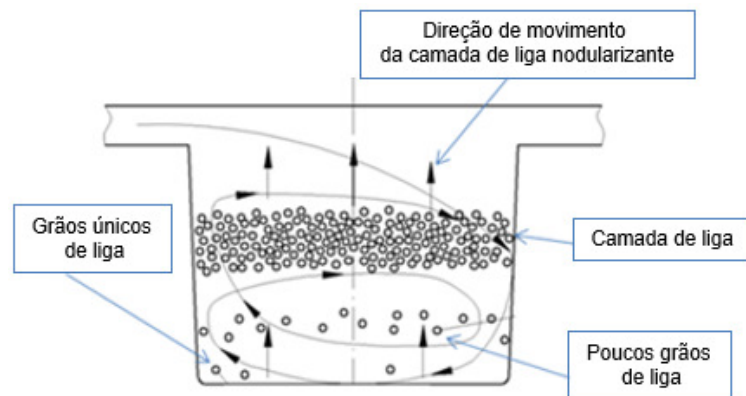
Pietrowski (2009) estudou câmaras de reação no formato retangular, cilíndrico e esférico. Observou que a reação do metal líquido com a liga nodularizante depende do comportamento do fluxo do metal líquido na câmara de reação sem, no entanto, abordar os resultados referentes à microestrutura do material. Just e Pacyniak (2012) estudaram a influência da forma da câmara de reação para a produção de ferro fundido nodular pelo processo de fundição por espuma perdida. Os resultados de pesquisa são apresentados utilizando três formas de câmara de reação: retangular, cilíndrica e esférica. O percentual de liga nodularizante utilizada foi de 1,5% do peso do metal a ser tratado. Os resultados apresentaram similaridade em relação à tecnologia tradicional de moldagem em areia.

3.8.1 Câmara de reação na forma retangular

Câmaras de reação na forma retangular levam à turbulência e impacto do fluxo de metal na sua parede do fundo. Cria-se um filme de superfície (fluxos de duas fases), onde existem grãos únicos de liga nodularizante de magnésio. Devido a essa turbulência e impacto do fluxo, a maior parte da liga de magnésio se desloca para o

topo, obtendo boa nodularização na parte superior e nodularização comprometida na região inferior da câmara. Na Figura 23 é apresentado um esquema de camada de fluxo bifásico em câmara de reação com formato retangular. Segundo o autor tem-se uma altura de aproximadamente 5mm do fundo da câmara (parede plana), aparece o assim chamado filme de líquido em fluxo de duas fases (PIETROWSKI, 2009).

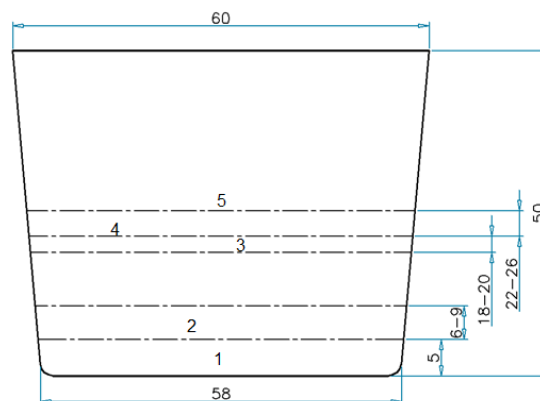
Figura 23: Câmara de reação na forma retangular.



Fonte: Adaptado de Pietrowski (2009).

A microestrutura desenvolvida em uma câmara de reação retangular empregada no processo de nodularização *in mold* foi investigada por Pietrowski (2009). Nesse caso, foram observados resultados considerando diferentes alturas em relação ao fundo da câmara, conforme representação esquemática da Figura 24.

Figura 24: Demonstração das alturas (em mm) na câmara de reação na forma retangular.

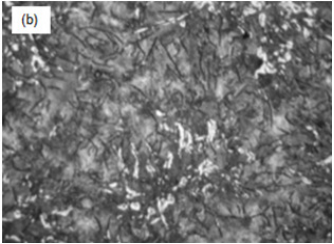
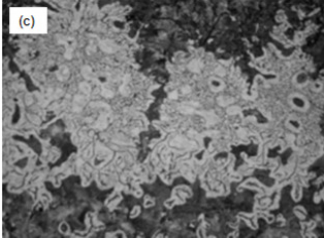
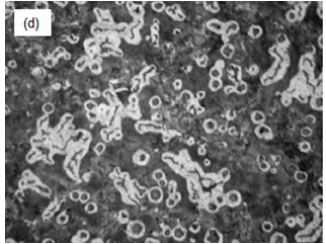
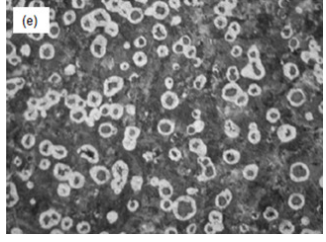
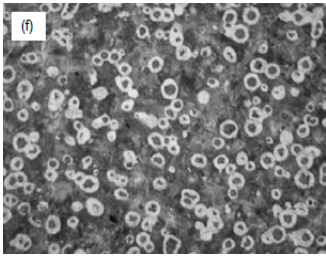


Fonte: Adaptado de Pietrowski (2009).

No Quadro 9 são apresentadas as imagens relativas à microestrutura (microscopia óptica), de acordo com a demonstração das alturas, nas quais podem

ser observadas as características da matriz e a forma da grafita.

Quadro 9: Microestruturas observadas em câmara de reação retangular para ferro fundido nodular.

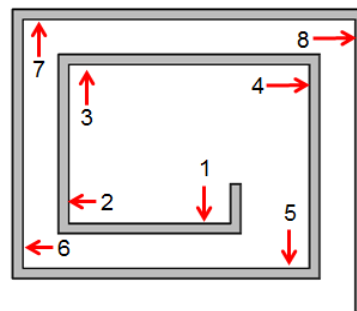
Câmara de reação na forma retangular			
Áreas	Alturas (mm)	Microestrutura	Imagens da microestrutura
1	5	Grafita lamelar (traços escuros) e pouca quantidade de ferrita (regiões claras) em um fundo escuro de matriz perlítica.	
2	6-9	Presença de grafita lamelar (traços escuros) e grande quantidade de ferrita (regiões claras) em um fundo escuro de matriz perlítica.	
3	18-20	Presença de pequena quantidade de grafita lamelar e quantidade maior de grafita vermicular e nodular cercadas por ferrita no fundo de perlita.	
4	22-26	Pouca quantidade de grafita vermicular e uma quantidade predominante de grafita nodular cercada por ferrita (regiões claras), em uma matriz perlítica	
5	Acima de 26	Predominância de grafita nodular cercada por ferrita (regiões claras), em uma matriz perlítica.	

Fonte: Pietrowski (2009).

Outro resultado apresentado utilizando a câmara na forma retangular é

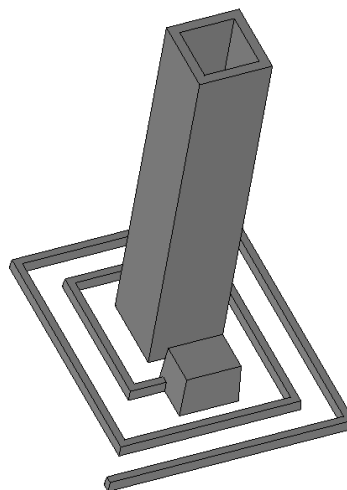
mostrado a seguir, referente ao trabalho desenvolvido por Just; Pacyniak (2012). O sistema foi preparado conforme as Figuras 25 e 26, nas quais são indicadas as regiões de coleta das amostras para análise metalográfica e o molde de teste com câmara de reação na forma retangular, respectivamente. O vazamento foi realizado por meio de um tubo de prisma retangular, passando pela câmara de reação e, em seguida, o metal líquido fluíu para os corredores em forma de cubo.

Figura 25: Locais marcados de coletas de amostras metalográficas.



Fonte: Adaptado de Just; Pacyniak (2012).

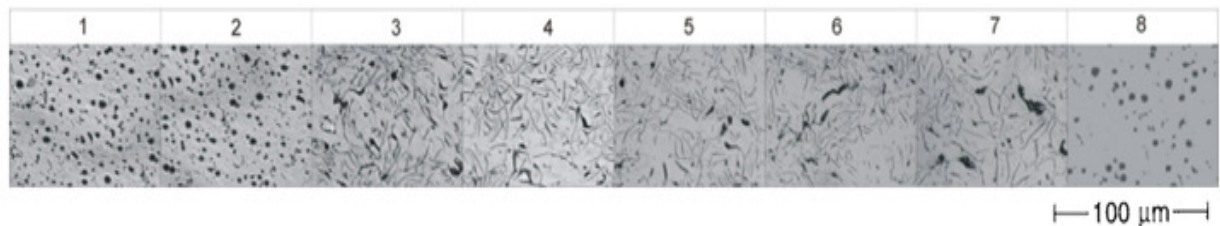
Figura 26: Molde de teste com câmara de reação na forma retangular.



Fonte: Adaptado de Just; Pacyniak (2012).

Na Figura 27 podem ser observados os resultados da análise metalográfica conduzida por microscopia óptica utilizando câmara de reação na forma retangular. Verifica-se a presença de grande quantidade de grafita lamelar e grafita nodular em poucas regiões (JUST; PACYNIK, 2012).

Figura 27: Resultados de metalografia utilizando câmara de reação na forma retangular.

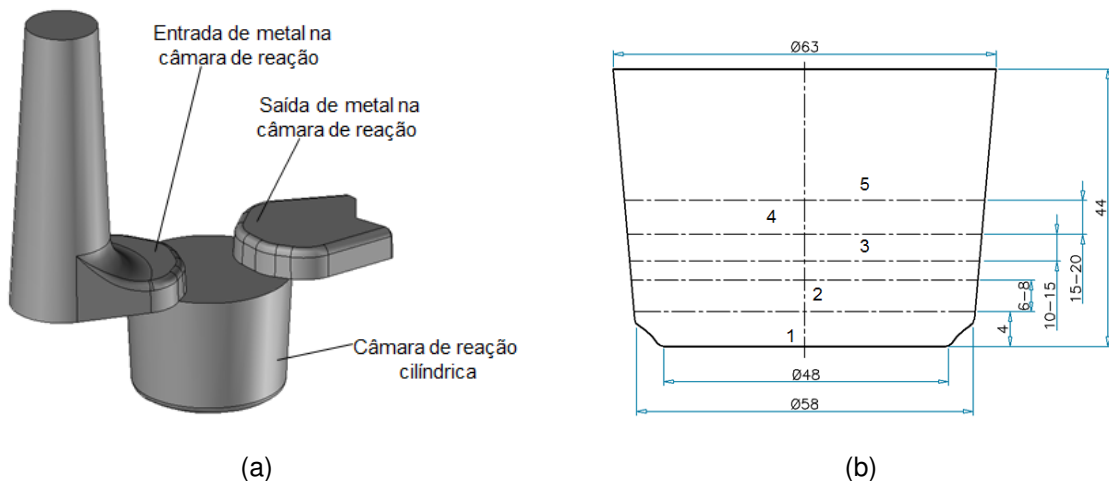


Fonte: Just; Pacyniak (2012).

3.8.2 Câmara de reação na forma cilíndrica

No interior da câmara de reação na forma cilíndrica ocorre movimentação de rotação do metal líquido. Testes práticos, no entanto, demonstram que a reação entre a liga nodularizante e o metal líquido não se completa até o final da passagem de metal na saída da câmara de reação conforme desenho ilustrativo da Figura 28(a). Pietrowski (2009), similarmente à análise conduzida na câmara de reação retangular com liga nodularizante contendo magnésio, investigou a microestrutura do ferro fundido utilizando câmara de reação cilíndrica, considerando novamente diferentes alturas em relação ao fundo, conforme a representação mostrada na Figura 28(b).

Figura 28: Ilustração indicativa da entrada e saída de metal na câmara de reação cilíndrica.

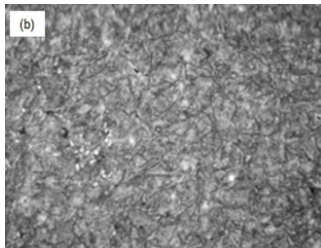
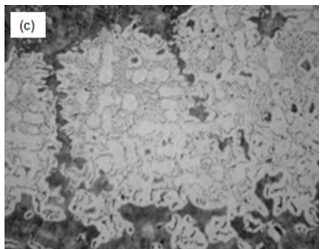
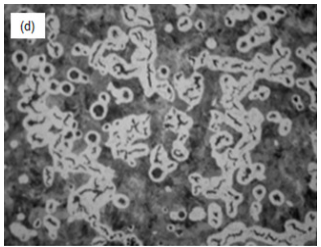
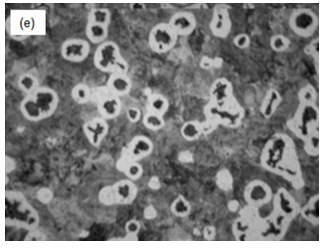
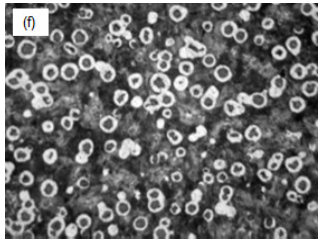


Fonte: Adaptado de PIETROWSKI (2009).

No Quadro 10 são mostradas as imagens obtidas por microscopia óptica da microestrutura, de acordo com a demonstração das alturas, desenvolvida na câmara cilíndrica do trabalho de Pietrowski (2009). Os resultados de microestrutura (matriz e

forma da grafita), são similares aos resultados da câmara de reação na forma retangular.

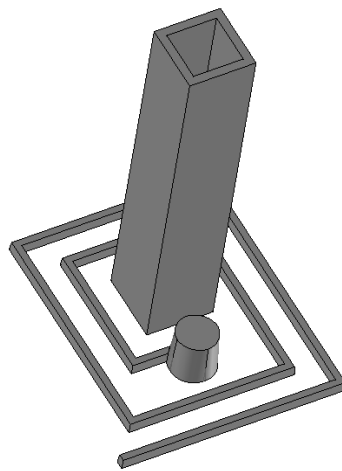
Quadro 10: Microestruturas observadas em câmara de reação na forma cilíndrica para o ferro fundido nodular.

Câmara de reação na forma cilíndrica			
Áreas	Alturas (mm)	Microestrutura	Imagens da microestrutura
1	4	Estrutura caracterizada por traços de grafita lamelar com uma pequena quantidade de ferrita na coloração clara.	
2	6-8	Presença de grande quantidade de ferrita na cor clara, com grafita na forma lamelar e vermicular.	
3	10-15	Presença de pequena quantidade de grafita lamelar e quantidade maior de grafita vermicular e nodular, cercadas por ferrita no fundo de perlita.	
4	15-20	Predominância de grafita nodular cercada por ferrita (regiões claras) em uma matriz perlítica.	
5	Acima de 20	Predominância de grafita nodular cercada por ferrita (regiões claras) em uma matriz perlítica.	

Fonte: Pietrowski (2009).

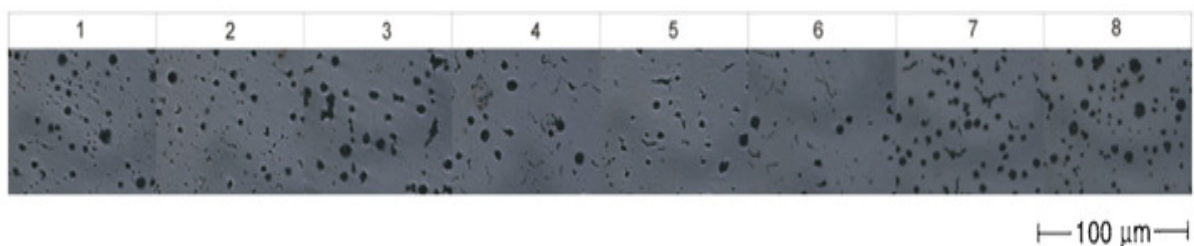
Os resultados de microestrutura apresentados por Just e Pacyniak (2012) obtidos em moldes utilizando câmara de reação de forma cilíndrica para a produção de ferro fundido nodular pelo processo de fundição por espuma perdida, cuja representação é mostrada na Figura 29, são exibidos na Figura 30. Em comparação com os resultados verificados para o processo conduzido com câmara de reação retangular (Figura 27), uma quantidade maior de grafita nodular está presente, com ainda proporções de grafita vermicular (JUST; PACYNIK, 2012).

Figura 29: Molde de teste com câmara de reação na forma cilíndrica.



Fonte: Adaptado de Just; Pacyniak (2012).

Figura 30: Resultados de metalografia utilizando câmara reação na forma cilíndrica.



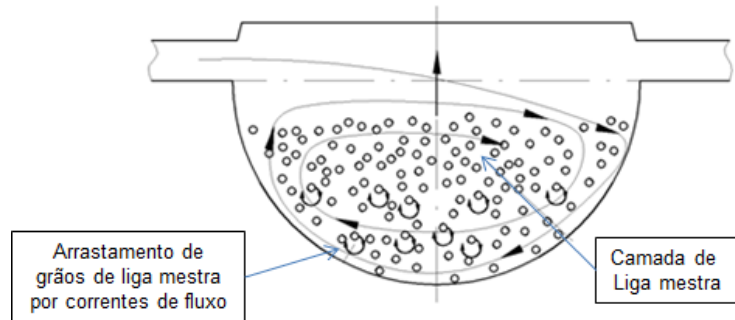
Fonte: Just; Pacyniak (2012).

3.8.3 Câmara de reação na forma esférica

Segundo Pietrowski (2009), a câmara de reação na forma esférica, devido ao seu formato, garante um movimento de rotação do metal líquido em todas as regiões e, por esta razão, obtêm-se um processo de nodularização mais eficiente. Com o movimento de rotação intensivo, os grãos de liga mestra se deslocam uniformemente,

favorecendo uma melhor eficiência do tratamento. Na Figura 31 é apresentado um esquema de câmara de reação esférica, demonstrando o arrastamento de grãos de liga mestra por correntes de fluxo.

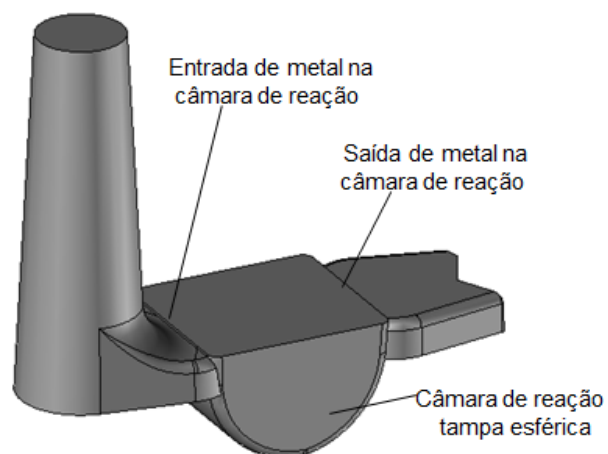
Figura 31: Câmara de reação na forma esférica.



Fonte: Pietrowski (2009).

Na Figura 32 é apresentada uma ilustração indicativa da entrada e saída de metal na câmara de reação na forma esférica.

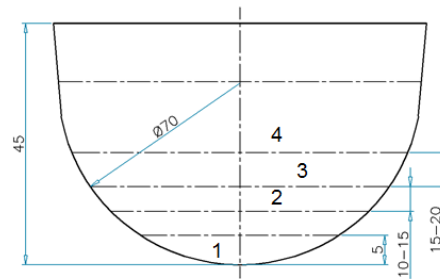
Figura 32: Ilustração indicativa da entrada e saída de metal na câmara de reação na forma esférica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

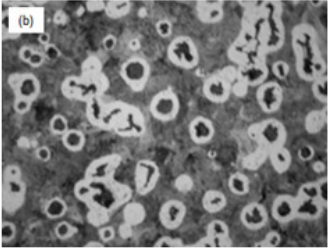
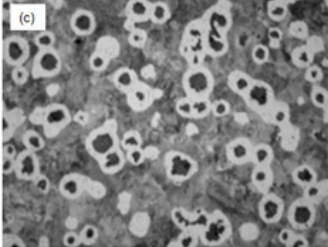
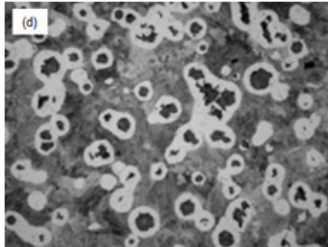
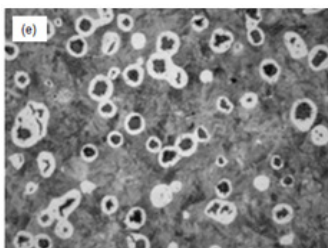
Na Figura 33 é exibida a representação da câmara de reação esférica utilizada no trabalho de Pietrowski (2009), com as alturas consideradas para a análise metalográfica, cujos resultados são mostrados no Quadro 11. Foi verificado que nenhuma das camadas analisadas apresentou grafita na forma lamelar.

Figura 33: Demonstração das alturas na câmara de reação na forma esférica.



Fonte: Adaptado de Pietrowski (2009).

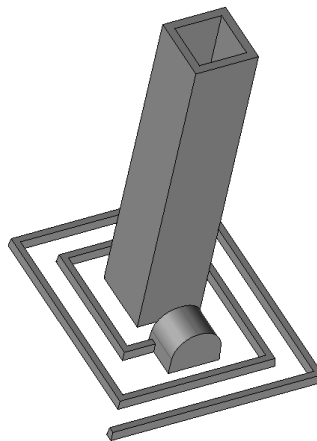
Quadro 11: Microestruturas observadas em câmara de reação na forma esférica para ferro fundido nodular.

Câmara de reação na forma esférica			
Áreas	Alturas (mm)	Microestrutura	Imagens da microestrutura
1	5	Grafita na forma vermicular e nodular.	
2	10-15	Grande quantidade de grafita nodular e pequena quantidade de grafita vermicular.	
3	15-20	Elevada proporção de grafita nodular	
4	Acima de 20	Elevada proporção de grafita nodular.	

Fonte: Pietrowski (2009).

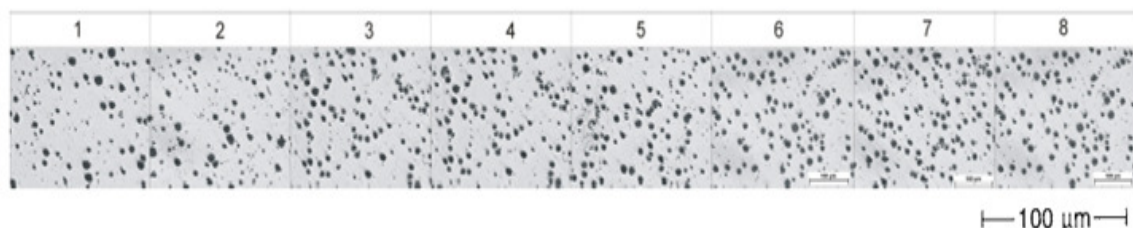
Resultados apresentados por Just; Pacyniak (2012) em moldes utilizando a câmara de reação na forma esférica, conforme ilustrado na Figura 34, mostraram maior homogeneidade da microestrutura e maior concentração de grafita nodular em comparação com as formas retangulares e cilíndricas (Figuras 27 e 30), como pode ser verificado na Figura 35. Nesse caso, a microestrutura está isenta de grafita lamelar.

Figura 34: Molde de teste com câmara de reação na forma esférica.



Fonte: Adaptado de Just; Pacyniak (2012).

Figura 35: Resultados de metalografia utilizando câmara de reação na forma esférica.

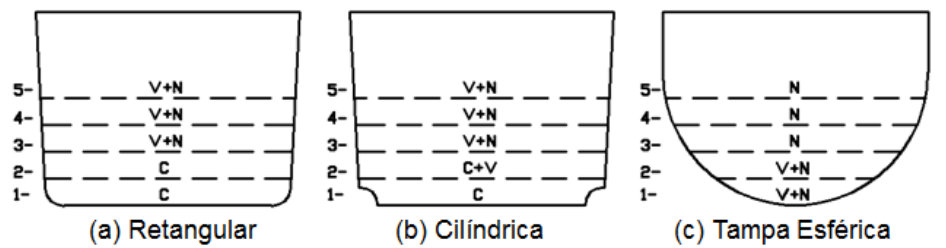


Fonte: Just; Pacyniak (2012).

3.8.4 Resultado comparativo entre as formas de câmaras de reação

Na Figura 36 é mostrado um resumo da forma da grafita nas câmaras de reação utilizadas no formato retangular, cilíndrica e esférica referentes ao trabalho desenvolvido por Pietrowski (2009). Pela análise das formas da grafita encontradas em cada altura das câmaras de reação, observa-se que a forma esférica garantiu uma melhor eficiência na nodularização e ainda uma melhor homogeneidade da estrutura na formação de grafita esferoidal.

Figura 36: Resumo da forma da grafita nas câmaras de reação.

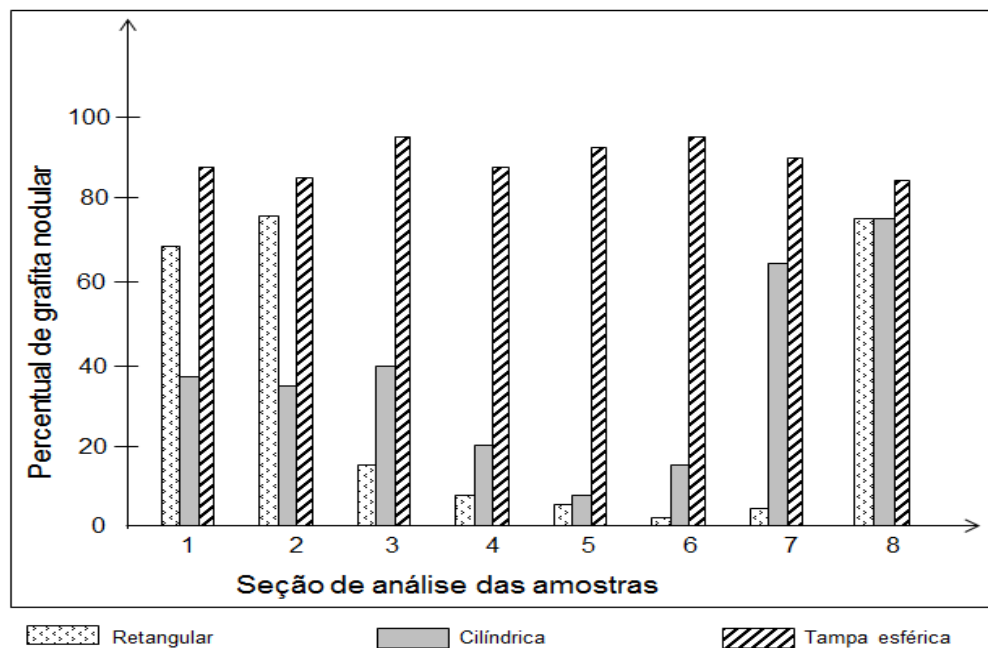


V+N: vermicular + nodular, C: cinzento, C+V: cinzento + vermicular, N: nodular

Fonte: Adaptado de Pietrowski (2009).

No Gráfico 5 são apresentados os resultados referentes ao trabalho de Just; Pacyniak (2012) também para os três tipos de câmara de reação. O percentual de nodularização é evidenciado nas oito amostras para cada molde. Observa-se que a câmara de reação que apresenta menor quantidade de grafita nodular é no formato retangular. E o formato esférico é o que apresenta melhor resultado com relação ao grau de nodularização e homogeneidade da microestrutura.

Gráfico 5: Percentual de grafita nodular para as amostras avaliadas.



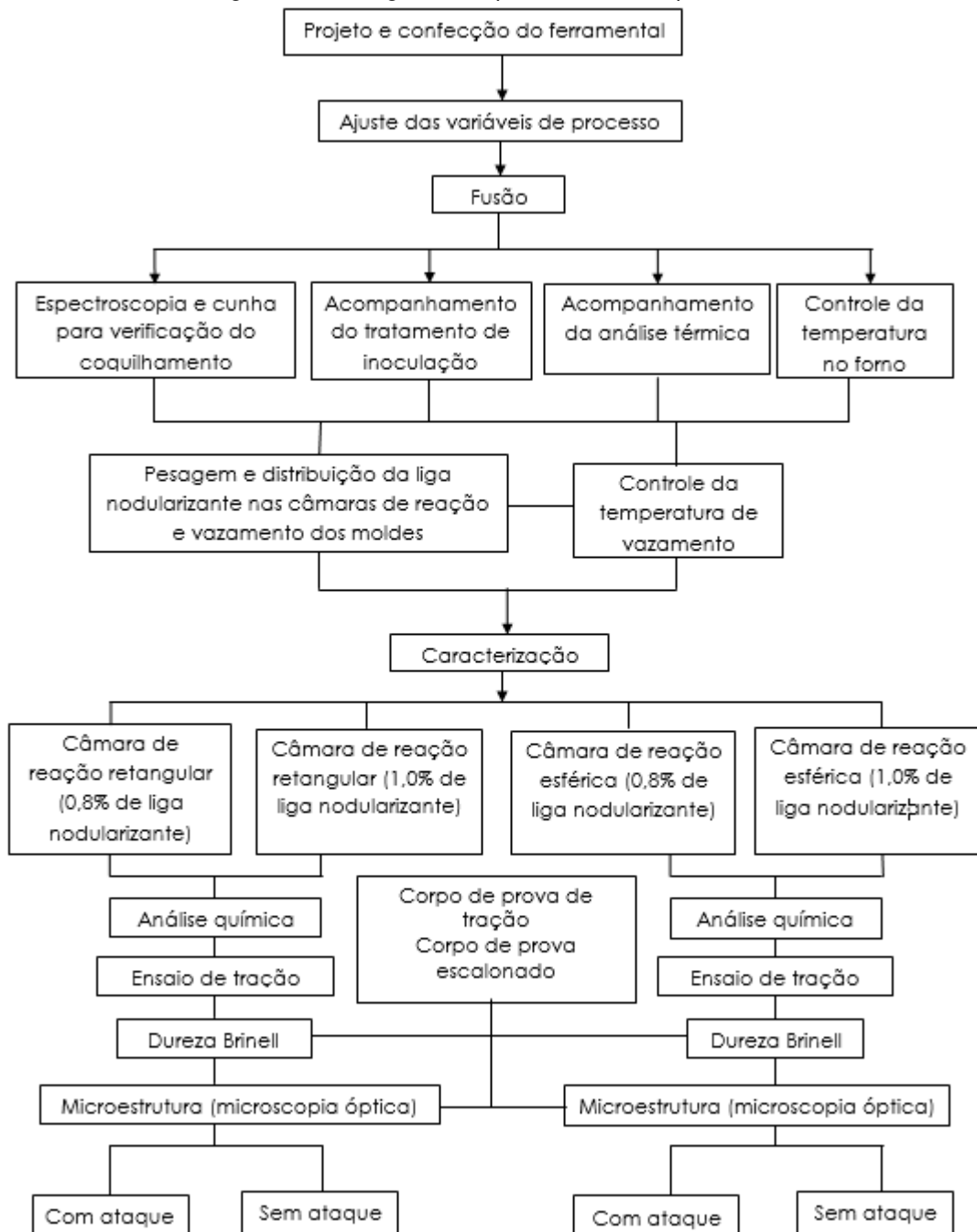
Fonte: Adaptado de Just; Pacyniak (2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição geral e delimitação da pesquisa

O fluxograma da metodologia empregada no presente estudo é apresentado na Figura 37, após revisão bibliográfica sobre o tema.

Figura 37: Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste trabalho investiga-se o efeito de duas variáveis de processo na metodologia de nodularização in mold para fabricação de ferro fundido nodular. A primeira variável é o estudo das formas e dimensões da câmara de reação retangular e esférica. A segunda variável em estudo é a alteração da proporção de liga nodularizante na câmara de reação, 0,8% e 1,0%, para avaliar o comportamento da dissolução da liga durante o tempo de reação e o impacto deste fenômeno na microestrutura.

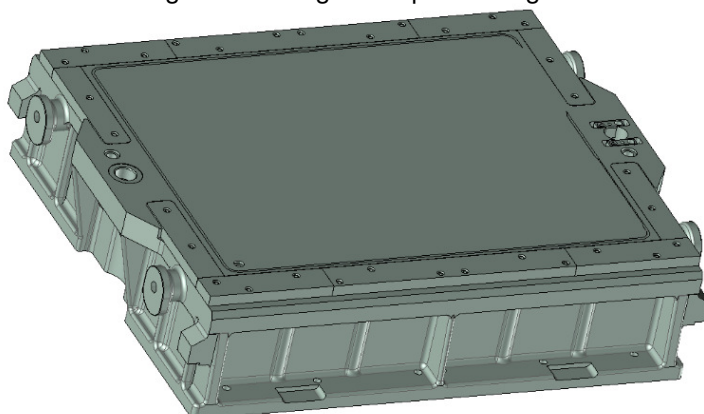
As etapas de processo como carga metálica, análise térmica, controle das características da liga nodularizante, propriedades da areia de moldagem e tempo de desmoldagem não foram mencionadas nesta pesquisa porque fazem parte do procedimento de controle de produção de peças automotivas seriadas fabricadas na empresa Tupy Minas Gerais Ltda, sendo, portanto, consideradas constantes.

4.2 Projeto e construção do ferramental

Uma placa integral foi utilizada para a montagem dos canais de alimentação e enchimento, corpos de prova escalonados e corpos de prova de tração. Na Figura 38 é mostrada uma imagem da placa integral utilizada para montagem dos canais e modelos. O projeto apresenta dois corpos de prova escalonados e dois corpos de prova para realização do ensaio de tração. Para evitar a formação de defeitos de contração, utilizou-se massalote na região de maior espessura do escalonado.

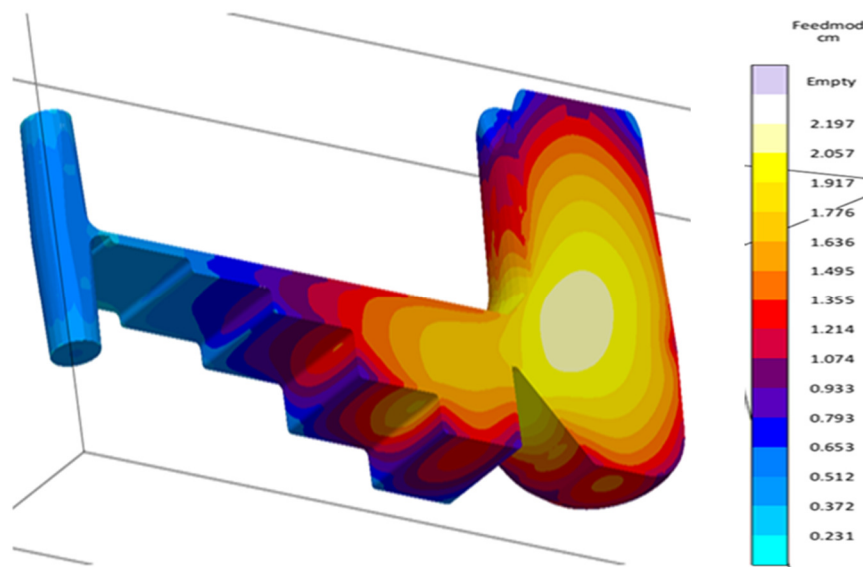
Para o dimensionamento do massalote, foram utilizados como referências os valores de módulos correspondentes à troca de calor, obtidos em um *software* de simulação computacional (MAGMASOFT®), conforme demonstrado na Figura 39.

Figura 38: Imagem da placa integral.



Fonte: Elaborado pelo autor.

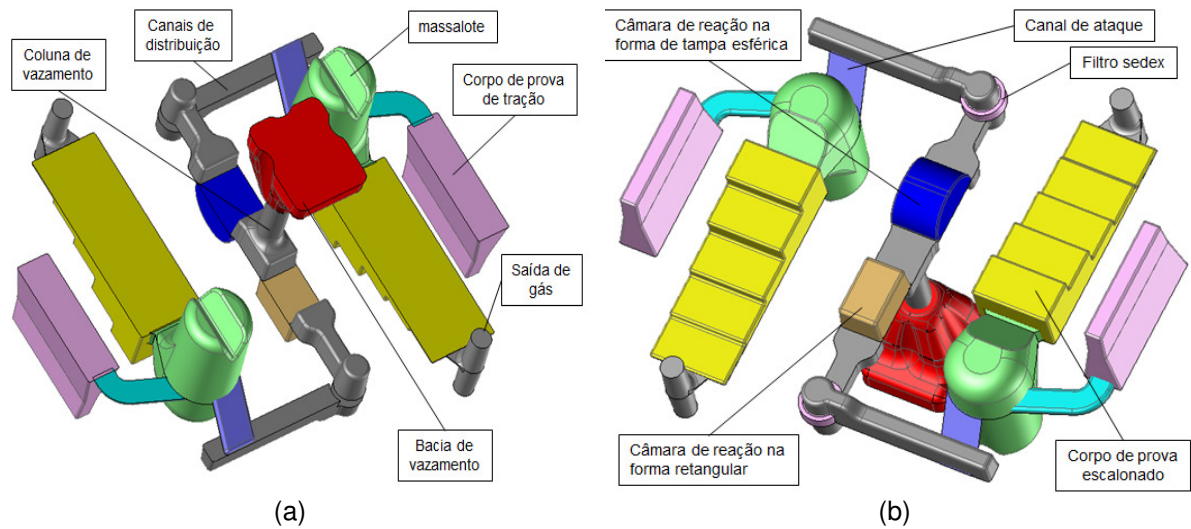
Figura 39: Valores de módulos obtidos em software de simulação computacional do corpo de prova escalonado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os corpos de prova, canais e massalotes, conforme dimensionamento e desenho, foram usinados em máquinas automáticas, produzidos em resina ZCON-WB-1404. Foi determinada uma câmara de reação para cada corpo de prova, sendo uma na forma retangular e a outra na forma esférica. As câmaras de reação foram construídas considerando o percentual de liga nodularizante de 1,0% com 15mm de altura de extra - câmara e para o teste com 0,8% de liga, a região de extra - câmara ficou com 22mm de altura. O filtro utilizado foi de Ø60mm x 17mm de altura, tipo esponja. Para evitar a formação de defeitos de junta fria e bolhas, na região de menor espessura do corpo de prova foram projetadas saídas de gases. O escalonamento para o cálculo do sistema de canais utilizado foi 1:2:0,85. A massa de todo o sistema de canais, bacia de vazamento e corpos de prova foi de aproximadamente 75,60 kg. O detalhamento do projeto está descrito no Apêndice A (COSTA, 1995; ABREU; SANTOS, 1987; PIETROWSKI, 2009). De acordo com os cálculos e simulação computacional realizada, a vazão prevista foi de 6,5 kg/s. A relação do percentual das áreas de entrada e saída nas câmaras de reação, canais de distribuição e ataques está demonstrada no desenho esquemático no apêndice A. A Figura 40 ilustra o projeto do ferramental, componentes do sistema de alimentação, enchimento e câmara de reação.

Figura 40: Projeto do ferramental, sistema de alimentação, enchimento e câmara de reação.

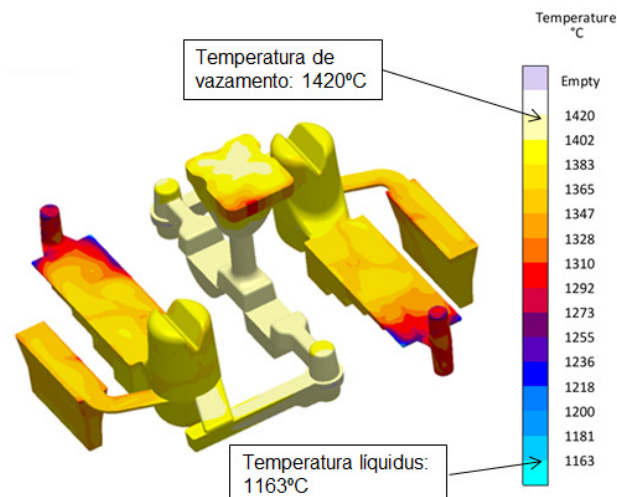


(a) vista superior, (b) vista inferior

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para verificar a eficácia dos cálculos para dimensionamento do sistema de alimentação e enchimento conforme evidenciado no Apêndice A, realizou-se uma simulação no *software* computacional mencionado anteriormente. A Figura 41 mostra o perfil do preenchimento da cavidade do molde considerando uma temperatura média de vazamento de 1420°C e temperatura líquidus de 1163°C (COSTA, 1995). . Observa-se homogeneidade de temperatura, com o sistema apresentando valores abaixo de 1300°C apenas nas extremidades da menor espessura de parede do corpo de prova escalonado.

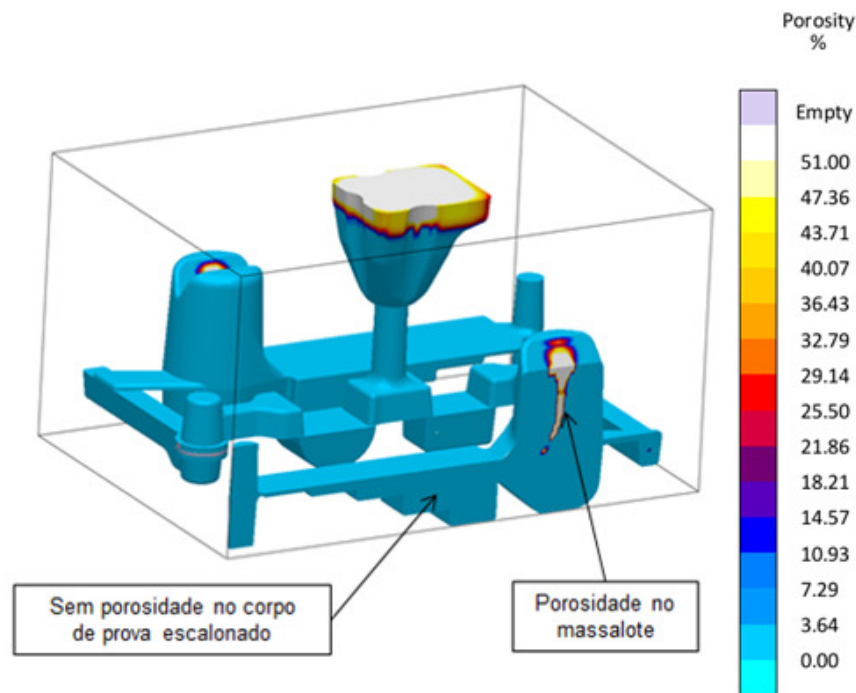
Figura 41: Simulação computacional do preenchimento da cavidade do molde.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 42 é mostrado o perfil de porosidade após o resfriamento. Observa-se a ocorrência de rechupe no massalote. No corpo de prova escalonado não foi verificado esse tipo de defeito.

Figura 42: Simulação computacional do perfil de porosidade após o resfriamento.



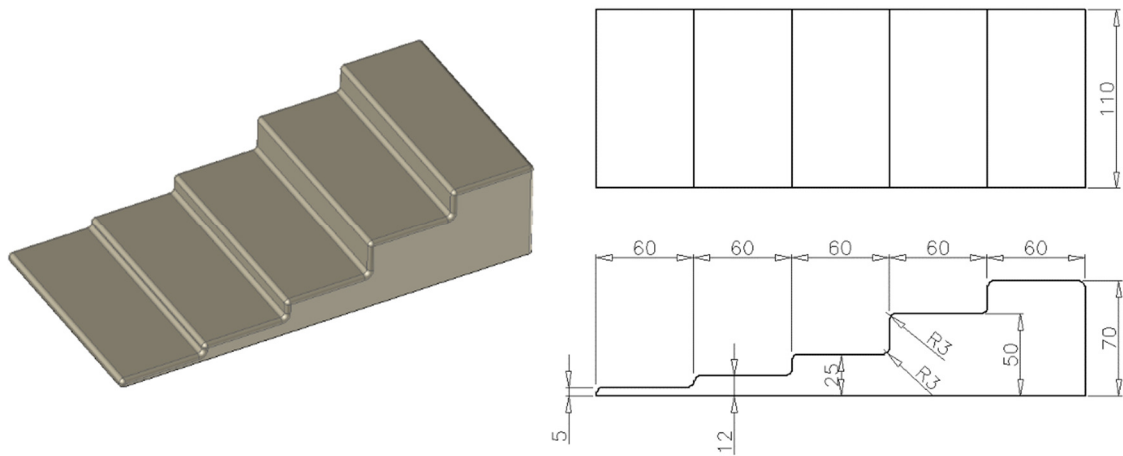
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Dimensões dos corpos de prova

Neste trabalho foram utilizados no presente trabalho corpos de prova escalonados nas espessuras de 5mm, 12mm, 25mm, 50mm e 70mm para realização das análises metalográficas, conforme ilustrado na Figura 43. As dimensões do corpo de prova escalonado foram definidas a partir das espessuras das peças automobilísticas produzidas em ferro fundido nodular como, por exemplo, mangas de eixo, virabrequins, árvore comando de válvula e suporte motor e também por meio de referências bibliográficas como Stawarz et al. (2017) e Kamińska et al. (2018).

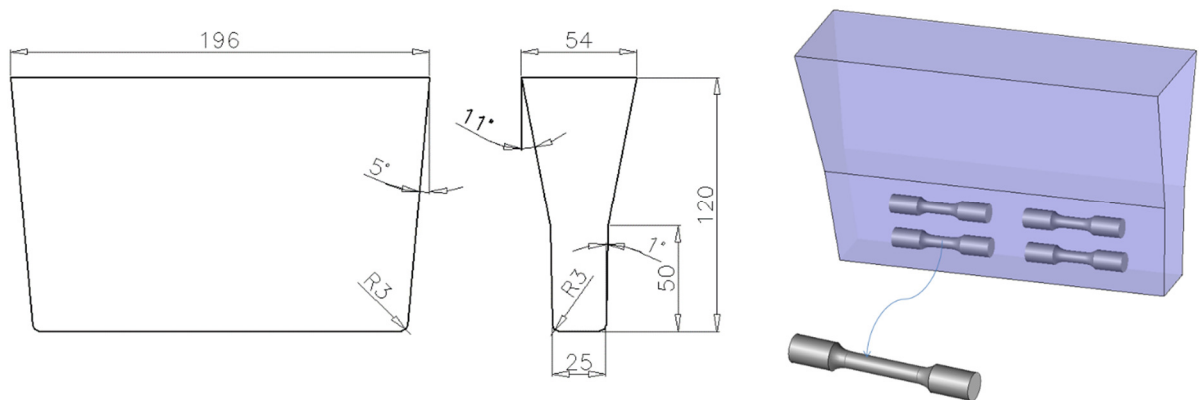
A Figura 44 evidencia o desenho esquemático do corpo de prova bruto para o ensaio de tração. A partir desse, foram usinados 4 corpos de prova, conforme demonstrado na própria Figura 44. A Figura 45 mostra o desenho do corpo de prova usinado para o ensaio de tração.

Figura 43: Imagem e detalhe do corpo de prova escalonado (dimensões em mm).



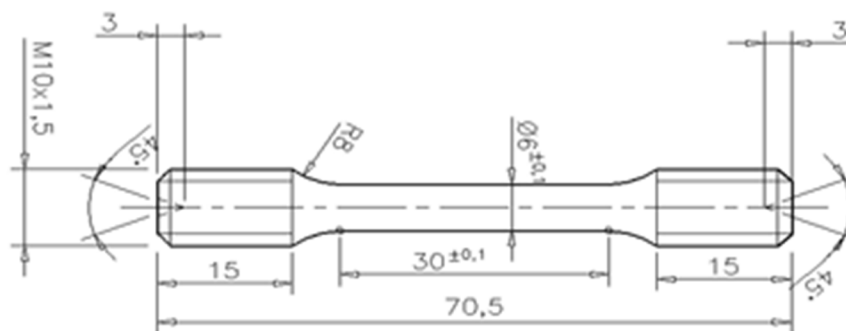
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44: Desenho do corpo de prova bruto para tração (dimensões em mm).



Fonte: ASTM A536-84.

Figura 45: Desenho do corpo de prova usinado para tração (dimensões em mm).

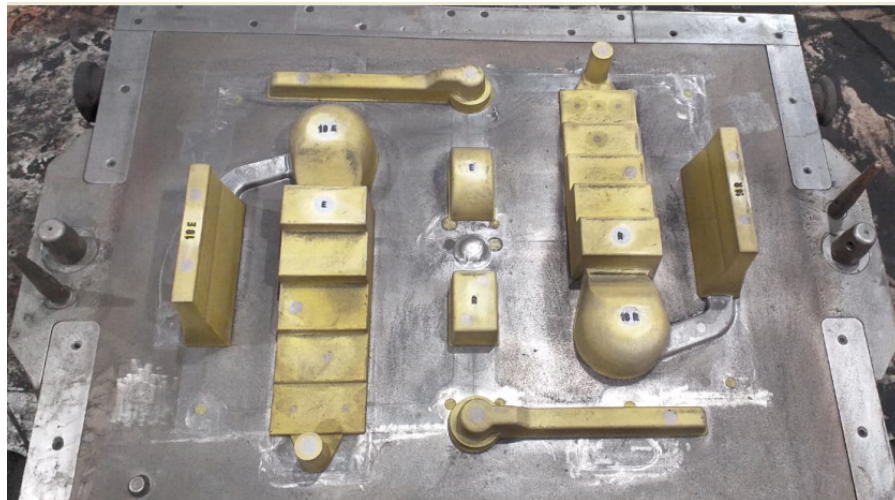


Fonte: ASTM E8/E8M-16.

4.4 Identificação dos corpos de prova, componentes do sistema de alimentação e câmaras de reação

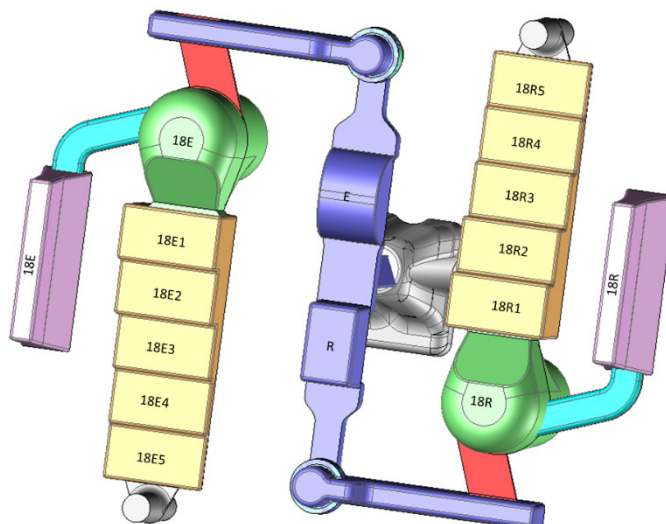
Para facilitar a identificação das amostras, durante o desenvolvimento do trabalho, foi utilizada a mesma padronização de codificação. Foram identificados com letras no ferramental as câmaras de reação, a bacia do massalote e os corpos de prova de tração, conforme mostrado na Figura 46. Para as espessuras dos corpos de prova escalonados foi conduzida tipagem após vazamento das peças para evitar excesso de letras no ferramental, como pode ser observado nas Figuras 47 e 48.

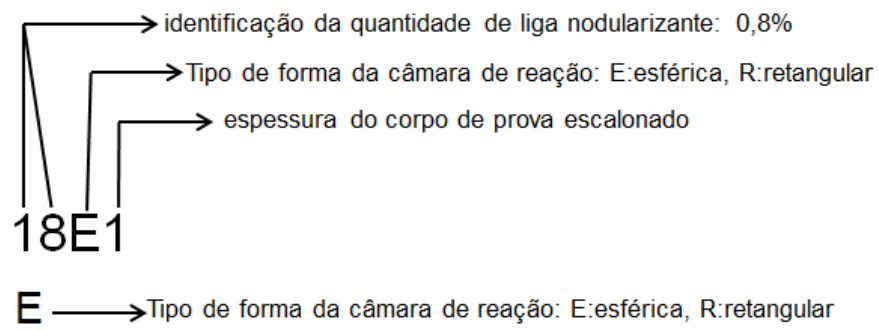
Figura 46: Identificação no ferramental.



Fonte: Elaborado pelo autor.

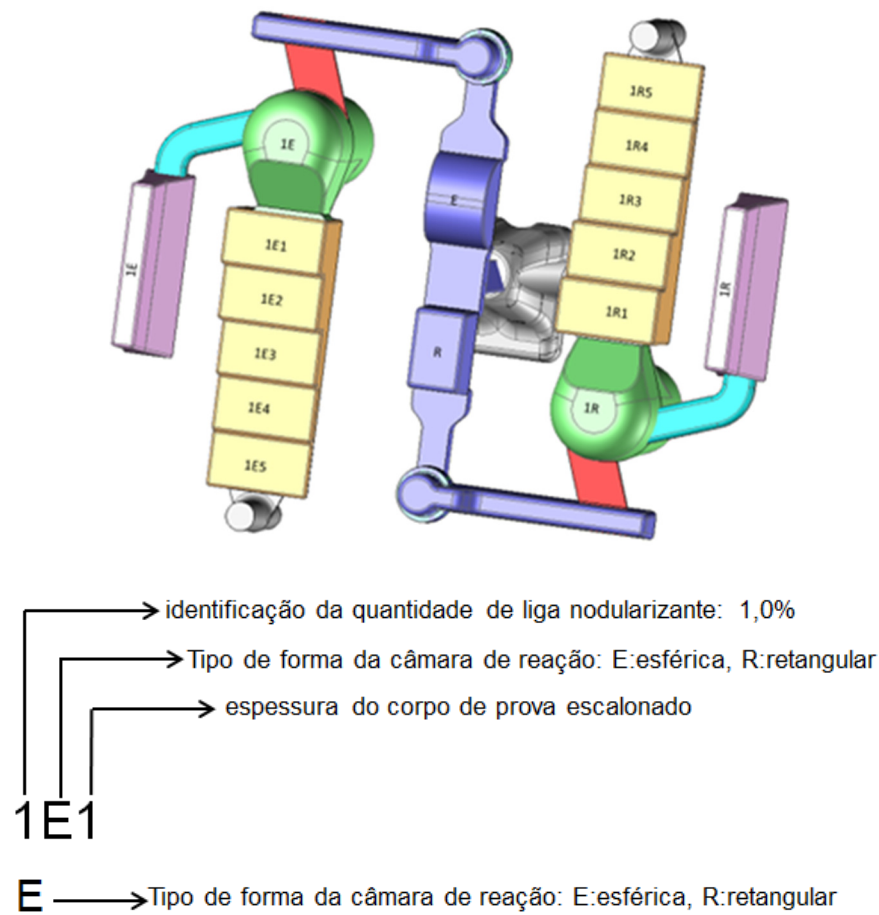
Figura 47: Identificação com 0,8% de liga nodularizante.





Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48: Identificação com 1,0% de liga nodularizante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Ajuste das variáveis de processo

Para ajuste de algumas variáveis de processo foi realizada uma fusão como: vazão, tempo de enchimento e área da seção longitudinal das câmaras de reação.

Dois moldes foram confeccionados em areia sílico-argilosa sintética conforme demonstrado na Figura 49. A liga foi pesada e distribuída nas câmaras de reação e controlado com régua milimetrada a região da altura do extra-câmara. No primeiro molde foram utilizados 335 gramas de liga correspondendo ao percentual de 1,0% em relação a quantidade de metal tratado, ou seja, 66,91 kg e o segundo molde foram utilizados 265 gramas de liga correspondendo a 0,8% em relação a quantidade de metal tratado conforme indicado na Figura 50. Na Tabela 3 são mostrados os resultados metalúrgicos em relação ao pretendido. A partir desses resultados, foi ajustado o tempo de enchimento, com o objetivo de reduzir a vazão.

Figura 49: Moldes em areia sílico argilosa sintética.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50: Distribuição da liga nodularizante nas câmaras de reação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3: Resultados metalúrgicos em relação ao pretendido.

Variáveis	Temperatura no forno (°C)		Temperatura na panela (°C)		Tempo de vazamento (s)		Vazão (kg/s)		Peso do feixe (kg)		Dimensão do extra-câmara (mm)	
	Pret.	Enc.	Pret.	Enc.	Pret.	Enc.	Pret.	Enc.	Pret.	Enc.	Pret.	Enc.
Molde 265 gramas	1460-1480	1466	1410-1430	1425	11	12	6,5	6	75,6	71,6	22	19
Molde 335 gramas		1466		1420		14		5,1		71,6	15	16

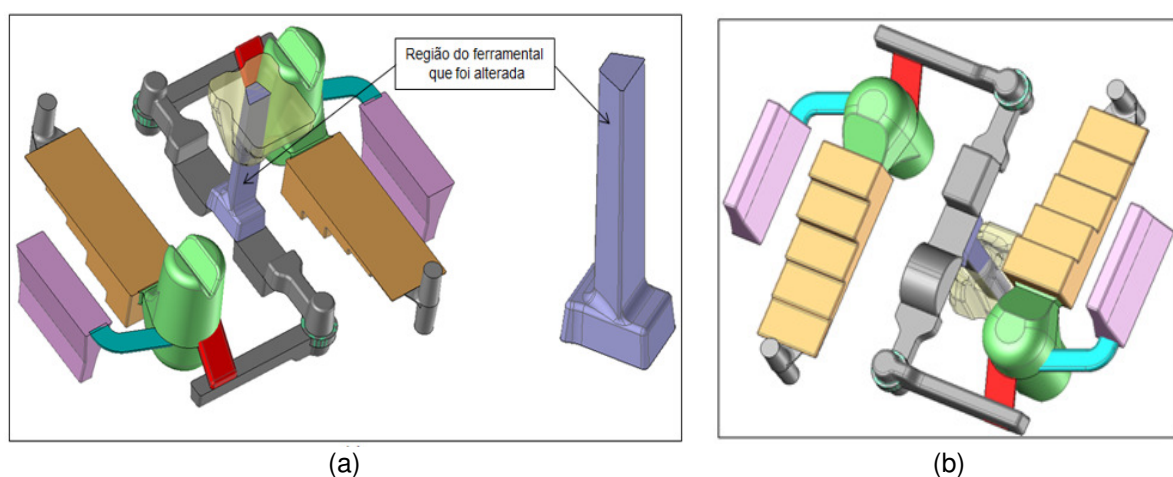
Pret.: pretendido, Enc.: encontrado

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 Modificação do projeto do ferramental após ajuste das variáveis de processo

Após a realização da primeira fusão, houve um acréscimo de 2 segundos no tempo de enchimento em relação ao valor pretendido. Para garantir o tempo de enchimento dos moldes de 11 segundos, foram modificadas a área da seção da coluna de vazamento e a forma da seção de circular para trapezoidal, conforme apresentado no Apêndice B (DUARTE, 2011). O desenho do projeto do ferramental modificado é mostrado nas Figuras 51 (a) e 51 (b).

Figura 51: Projeto do ferramental modificado.



(a) vista superior, (b) vista inferior

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7 Fusão e vazamento

4.7.1 Análise química

A definição da faixa de composição química de referência para o estudo proposto está descrita na Tabela 4. A liga foi definida baseando-se no levantamento das cinco principais composições químicas utilizadas para fabricação de componentes automotivos na empresa Tupy Minas Gerais Ltda, que corresponde ao grau GH 80-55-06 da norma ASTM A 536-84 (2019).

O motivo da escolha dessa composição química está relacionado à sua aplicabilidade, sendo utilizada para a fabricação de uma grande variedade de peças que exigem alto grau de segurança, como mangas de eixo, virabrequins e suporte de

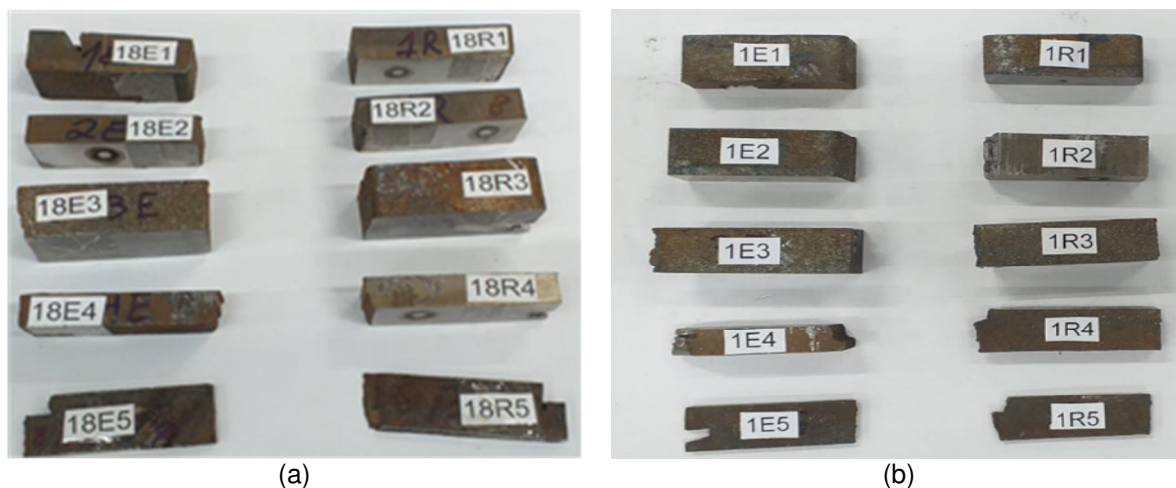
motor para a fabricação de automóveis, dentre outros (CAI; WEI, 2008). Análises químicas foram realizadas para investigar o teor de magnésio residual para cada tipo de forma de câmara de reação (retangular e esférica), nas quantidades de 0,8% e 1,0% de liga nodularizante em cada espessura do corpo de prova escalonado em um total de 20 amostras. Nas Figuras 52(a) e 52(b) são apresentadas as amostras que foram analisadas com 0,8% e 1,0% de liga nodularizante, respectivamente.

Tabela 4: Composição química de referência para o estudo proposto.

Elementos Ligas	%C	%Si	%Mn	%Cu	%P	%S	%Sn	%Mg	CE
1	3,45	2,25	0,25	0,37	0,058	0,012	0,004	0,041	4,22
2	3,78	2,15	0,19	0,41	0,047	0,009	0,005	0,033	4,51
3	3,79	2,19	0,20	0,43	0,052	0,012	0,006	0,038	4,54
4	3,83	2,09	0,19	0,40	0,059	0,010	0,007	0,035	4,54
5	3,57	2,38	0,23	0,36	0,054	0,009	0,006	0,030	4,38
Faixa: mín.	3,45	2,09	0,19	0,36	0,047	0,009	0,004	0,030	4,15
máx.	3,83	2,38	0,25	0,43	0,059	0,012	0,007	0,041	4,64

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52: Amostras analisadas no corpo de prova escalonado.



(a) amostras com 0,8% de liga nodularizante, (b) amostras com 1,0% de liga nodularizante

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os percentuais de carbono e enxofre foram obtidos pela combustão de amostras no equipamento analisador de carbono e enxofre CS744 da marca LECO, conforme Figura 53. As concentrações dos demais elementos químicos foram obtidas pelo método da espectroscopia de emissão óptica através do equipamento Spectrolab

do fabricante Spectro, conforme Figura 54.

Figura 53: Analisador de Carbono e Enxofre CS744 da marca LECO.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 54: Equipamento para análise de espectroscopia de emissão óptica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.2 Inoculação

Para a inoculação do ferro fundido nodular foi utilizado o inoculante ferro-silício-bário com lantânio (Fe-Si-Ba). A composição química está apresentada na Tabela 5 e o aspecto visual do inoculante é mostrado na Figura 55.

Tabela 5: Composição química do inoculante Fe-Si-Ba com lantânio.

Elementos (%)	Silício	Alumínio	Cálcio	Bário	Lantânio	Ferro
Faixa	72 – 80	<1,2	0,8-1,6	0,9-1,8	1,3-1,5	14-25

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55: Inoculante Fe-Si-Ba com lantânio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.3 Definição da temperatura de sobreaquecimento e vazamento

A faixa da temperatura de sobreaquecimento (temperatura no forno) foi de 1460°C a 1480°C. A temperatura estipulada para o vazamento dos moldes foi de 1410°C a 1430°C. Segundo Castledine (1979) e Costa (1995), a faixa de temperatura de vazamento deve manter-se entre 1380°C e 1450°C dependendo da espessura da peça. A medição na panela foi monitorada com pirômetro de imersão calibrado, utilizando termopares descartáveis. Foi medida a temperatura de vazamento e então foi vazado o primeiro molde com 0,8% de liga nodularizante e depois medida novamente a temperatura e vazado o molde com 1,0% de liga nodularizante. Na Tabela 6 estão as temperaturas de sobreaquecimento, vazamento e tempo de enchimento obtidas para cada molde. O controle da temperatura de vazamento é observado na Figura 56.

Tabela 6 - Temperaturas obtidas para cada molde.

Variáveis	Temperatura no forno (°C)		Temperatura de vazamento (°C)		Tempo de enchimento (s)	
	Pret.	Enc.	Pret.	Enc.	Pret.	Enc.
Molde com 0,8% de liga	1460-1480	1472	1410-1430	1428	11	11
Molde com 1% de liga		1472		1423		12

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 56: Controle da temperatura de vazamento.

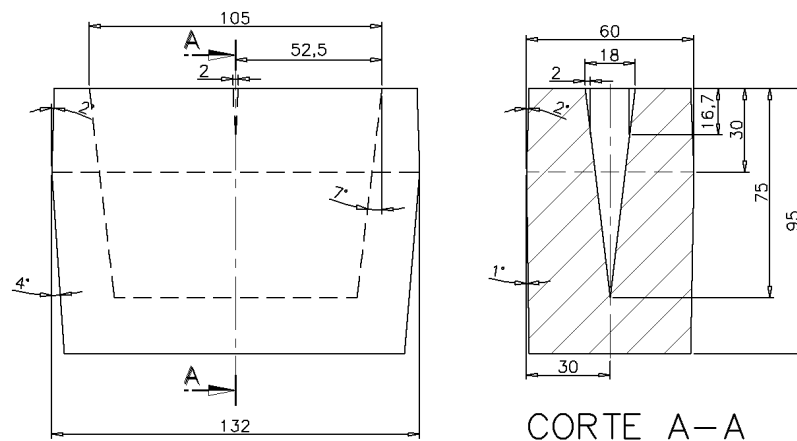


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.4 Análise de tendência ao coquilhamento

Foram vazados moldes com cavidades em forma de cunha, conforme ilustrado na Figura 57. Após o vazamento dos moldes, estes foram resfriados bruscamente com água e ar comprimido. A cunha foi quebrada na região do entalhe e a largura medida através de um gabarito.

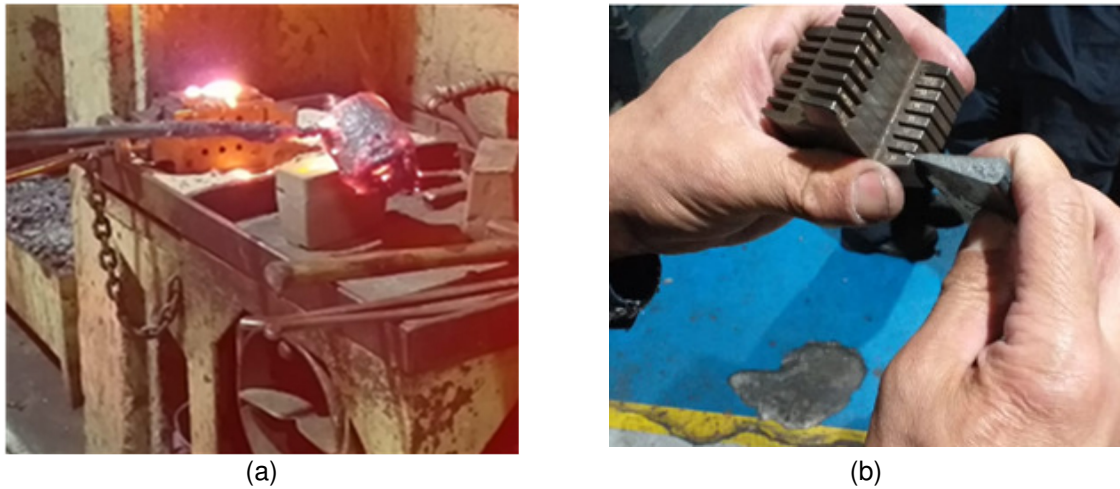
Figura 57: Desenho da cunha para análise do coquilhamento (dimensões em mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme padrão da Tupy Minas Gerais Ltda, esta largura deverá ser no máximo de 2,5 mm para evitar a tendência à formação de carbonetos, se a medida encontrada for maior, o metal não será vazado. O vazamento e medição da cunha são observados nas Figuras 58 (a) e 58 (b).

Figura 58: Vazamento e medição da cunha para coquilhamento.



(a) vazamento, (b) medição

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.8 Confeção dos moldes de areia

Foram confeccionados dois moldes em areia sílico argilosa sintética em máquina automática para cada fusão. No primeiro molde foi utilizado 0,8% de liga na câmara de reação e no segundo molde, 1,0% de liga nodularizante a base de FeSiMg com lantânio pesada e distribuída nas câmaras de reação. Os moldes, assim como a distribuição e pesagem da liga nodularizante em balança Prix 363, podem ser observados nas Figuras 59, 60 e 61. A Tabela 7 mostra a composição química da liga utilizada e o aspecto visual da liga nodularizante é evidenciado na Figura 62.

Figura 59: Moldes em areia sílico argilosa sintética.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 60: Distribuição da liga nodularizante nas câmaras de reação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 61: Pesagem da liga nodularizante nas câmaras de reação.



(a) pesagem com 0,8% de liga nodularizante, (b) pesagem com 1,0% de liga nodularizante

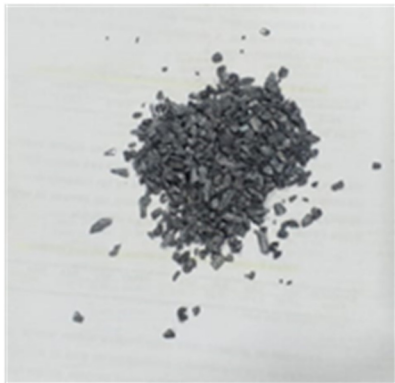
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7: Composição química da liga FeSiMg com lantânio.

Elementos	%Si	%Mg	%Al	%Ca	%MgO	%Fe	%Ba	%Ce	%La
Faixa	42-49	5,3-6,0	<1,20	0,40-0,70	<0,50	40-50	<0,10	<0,30	0,30-0,80

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 62: Liga Fe-Si-Mg com lantânio.



Fonte: Dados da pesquisa.

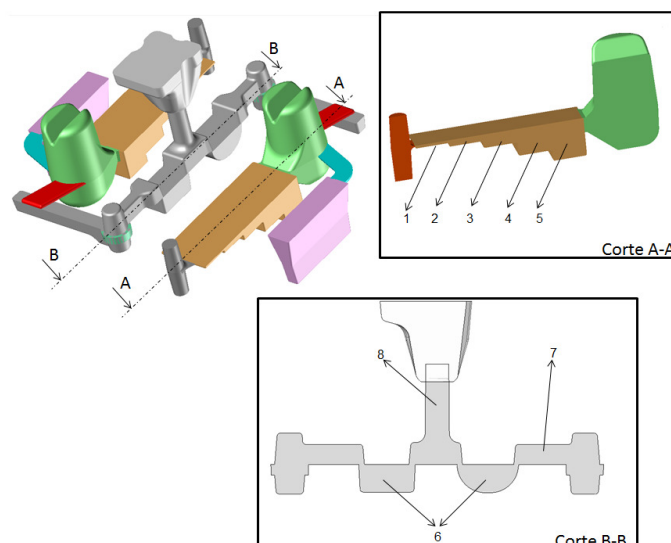
4.9 Caracterização

4.9.1 Caracterização microestrutural

Amostras foram retiradas da região central de cada espessura do corpo de prova escalonado, utilizando-se uma cortadora metalográfica, para as duas proporções de liga nodularizante (0,8% e 1,0%) para câmaras de reação no formato retangular e esférico, totalizando 40 amostras. Essas amostras foram avaliadas quantitativamente quanto a fatores relacionados tanto às características da grafita (amostra sem ataque químico) como da matriz desenvolvida (amostra com ataque químico). Em relação às características da grafita, verificou-se o grau de nodularização, número de nódulos por mm^2 , tamanho de nódulos e carbonetos. Em relação à matriz, determinou-se a proporção do constituinte perlita e da ferrita utilizando o *software* Streen Basic Olympus, conforme norma ASTM A247-19. Foram empregadas 10 imagens com ataque e 10 imagens sem ataque para cada espessura do corpo de prova escalonado.

Uma amostra foi retirada de cada região dos canais de distribuição, uma amostra na região de cada câmara de reação e uma amostra na região da coluna de vazamento. Na Figura 63 podem ser observadas as regiões nas quais foram retiradas as amostras.

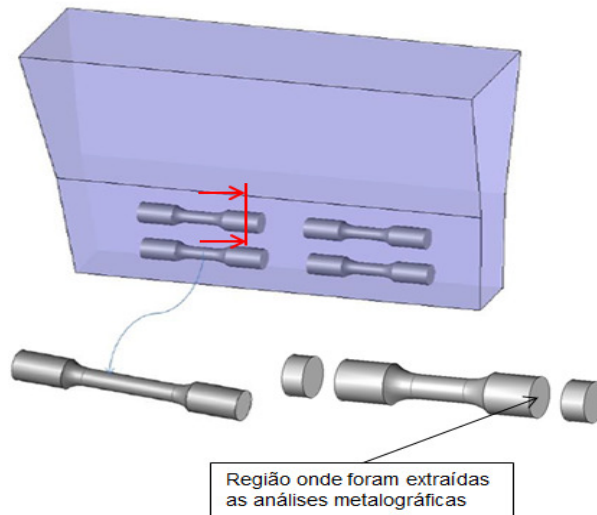
Figura 63: Regiões onde foram retiradas as amostras do corpo de prova escalonado e no sistema de canais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para comprovar a caracterização microestrutural no corpo de prova escalonado, amostras foram retiradas na seção do corpo de prova de tração conforme ilustrado na Figura 64. Foram obtidas dez imagens com ataque químico para cada condição de corpo de prova totalizando 40 imagens.

Figura 64:- Região onde foram extraídas as análises metalográficas no corpo de prova de tração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A preparação das amostras seguiu as técnicas de procedimento metalográfico convencionais, preparadas em equipamentos da marca Arotec, conforme exemplificado na Figura 65: i) corte com disco abrasivo e lubrificação; ii) embutimento a frio com polimetilmetacrilato ou a quente com resina fenólica; iii) lixamento, empregando lixas #120, #240, #320, #400, #600 e #1000; iv) polimento com pasta de diamante 9 μm , 3 μm 1 μm e v) ataque químico com reativo Nital 3%.

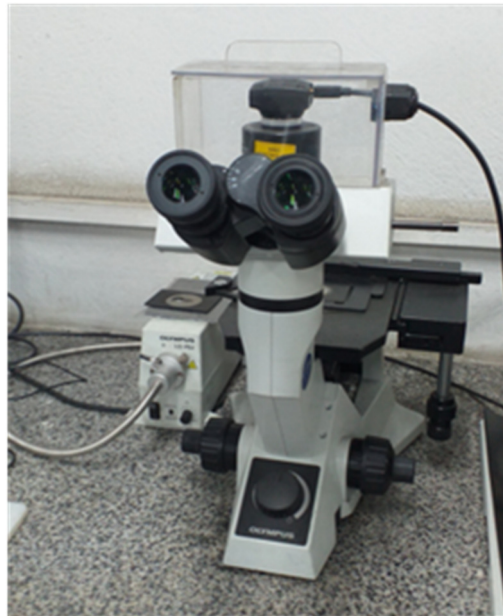
Figura 65: Equipamentos Arotec utilizados na preparação das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor, Laboratório Micrográfico Tupy Minas Gerais Ltda.

Para a análise microestrutural foi utilizado microscópio Olympus GX41 de propriedade da Tupy Minas Gerais Ltda para verificação do grau de nodularização e análise da matriz metálica conforme norma ASTM A 247-19. Na Figura 66 é mostrado imagem do microscópio ótico utilizado para análise e registro micrográfico das amostras.

Figura 66: Microscópio ótico utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor, Laboratório Micrográfico Tupy Minas Gerais Ltda.

4.9.2 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza foram conduzidos para todas as situações, ou seja, para as duas formas de câmara de reação, para as duas proporções de liga nodularizante e para todas as dimensões da região central do corpo de prova escalonado em um total de 20 amostras. As amostras com os ensaios de dureza realizados são mostradas na Figura 67.

Foi empregado o durômetro Brinell da marca Metro Com, com carga de 750 kgf, tempo de penetração de 15s e penetrador esférico com diâmetro de 5 mm. Realizaram-se três ensaios para cada condição. A preparação das amostras nesse caso foi parcialmente similar à metalográfica, envolvendo corte e lixamento. O ensaio foi realizado conforme demonstrado em imagem na Figura 68.

Figura 67: Amostras com os ensaios de dureza realizados.

CÂMARA RETANGULAR 1,0% DE LIGA	CÂMARA RETANGULAR 0,8% DE LIGA	ESPESSURAS	CÂMARA ESFÉRICA 1,0% DE LIGA	CÂMARA ESFÉRICA 0,8% DE LIGA
		ESPESSURA 70mm		
		ESPESSURA 50mm		
		ESPESSURA 25mm		
		ESPESSURA 12mm		
		ESPESSURA 5mm		

Fonte: Elaborado pelo autor.

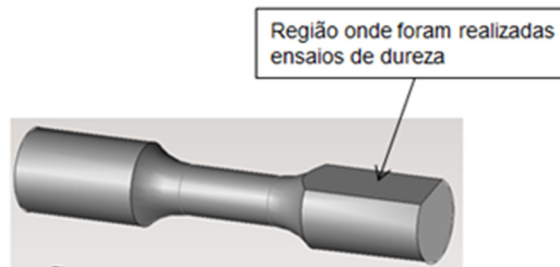
Figura 68: Máquina de ensaio de dureza (Durômetro Metro-com).



Fonte: Elaborado pelo autor, Laboratório Micrográfico Tupy Minas Gerais Ltda.

Para efeito de comparação dos valores de dureza entre os corpos de prova escalonados e de tração, foram realizados 3 ensaios de dureza no corpo de prova de tração conforme ilustrado na Figura 69.

Figura 69: Região onde foram realizadas ensaios de dureza no corpo de prova de tração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.9.3 Avaliação das propriedades mecânicas

A avaliação das propriedades mecânicas foi conduzida por meio de ensaios de dureza Brinell e ensaios de tração. Dessa forma, foram analisados aspectos relacionados à resistência mecânica e à ductilidade das ligas fundidas.

Os ensaios de tração foram realizados para as duas condições de liga nodularizante e para os dois tipos de câmara de reação, retangular e esférica. Os corpos de prova foram vazados e usinados conforme determina a norma ASTM E8/E8M – 16a. Estes ensaios foram conduzidos em três amostras para cada condição, em uma máquina universal de ensaios da marca Wolpert, conforme ilustrado na Figura 70(a) com a utilização de um extensômetro LO 25mm, modelo PY25/2,5, série 1139 conforme ilustrado na Figura 70(b). A velocidade/taxa de deformação inicial dos ensaios de tração foi de 3 a 4mm por minuto.

Figura 70: Equipamentos para Ensaios de Materiais.



(a)



(b)

(a) máquina universal de ensaios da marca Wolpert, (b) extensômetro utilizado.

Fonte: Elaborado pelo autor, Laboratório Micrográfico Tupy Minas Gerais Ltda.

A preparação dos corpos de prova para o ensaio de tração seguiu conforme descrito a seguir:

- (a) Pintura dos corpos de prova para marcação da área útil para medição do alongamento total;
- (b) Marcação da área útil com seis traços espaçados de 5 em 5mm;
- (c) Fixação do corpo de prova e do extensômetro à máquina de ensaios universais;
- (d) Rompimento do corpo de prova;
- (e) Medição do comprimento final após rompimento. O comprimento inicial foi considerado 30mm.

Na Figura 71 podem ser observadas imagens da preparação dos corpos de prova de tração com cada uma das etapas descritas anteriormente.

Figura 71: Preparação dos corpos de prova de tração.



(a) pintura, (b) marcação, (c) fixação, (d) rompimento, (e) mediação após rompimento

Fonte: Elaborado pelo autor, Laboratório Micrográfico Tupy Minas Gerais Ltda.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ajuste das variáveis de processo

5.1.1 Características de fundição

A fusão da liga para o ajuste das variáveis de processo apresentou o tempo de enchimento em média 2 segundos acima do calculado. A composição química obtida apresentou-se coerente com o que foi planejado. Na Tabela 8 constam as faixas pretendidas para cada elemento e os resultados alcançados.

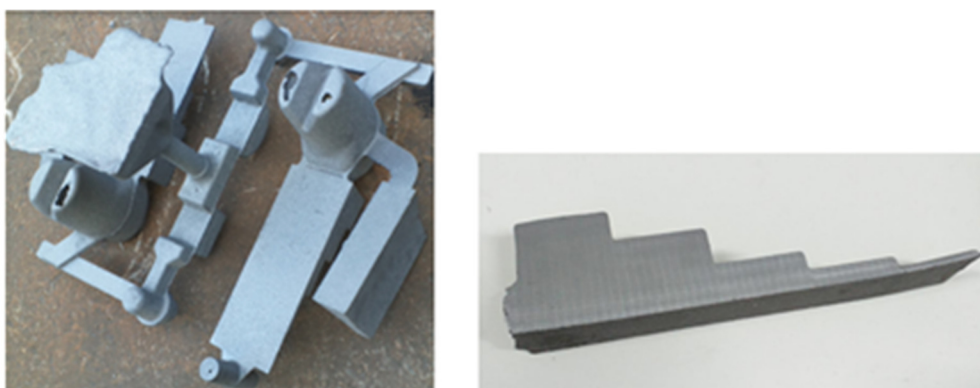
Tabela 8: Composição química obtida para o ajuste das variáveis de processo.

Elementos Ligas	%C	%Si	%Mn	%Cu	%P	%S	%Sn	%Mg	%CE
Faixa pretendida									
mín.	3,45	2,09	0,19	0,36	0,047	0,009	0,004	0,030	4,15
máx.	3,83	2,38	0,25	0,43	0,059	0,012	0,007	0,041	4,64
Resultados obtidos									
	3,81	2,12	0,21	0,40	0,049	0,011	0,004	0,032	4,53

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que os elementos químicos apresentaram teores dentro da faixa de variação permitida. O teor de magnésio residual foi analisado somente na espessura de 25mm do corpo de prova escalonado somente para controle do processo. Na Figura 72 é mostrada uma imagem do feixe e uma imagem do corpo de prova escalonado seccionado.

Figura 72: Imagem do feixe e corpo de prova escalonado seccionado.

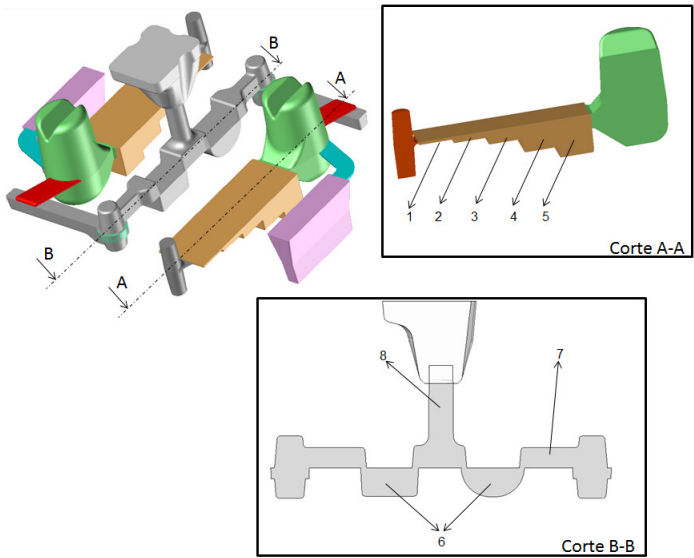


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.2 Caracterização microestrutural

As amostras da fusão para ajuste das variáveis de processo foram retiradas das regiões indicadas na Figura 73. Foi realizada a análise metalográfica sem ataque químico (grau de nodularização) e os resultados são apresentados na Tabela 9.

Figura 73: Análise metalográfica (grau de nodularização).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9: Resultados da análise metalográfica.

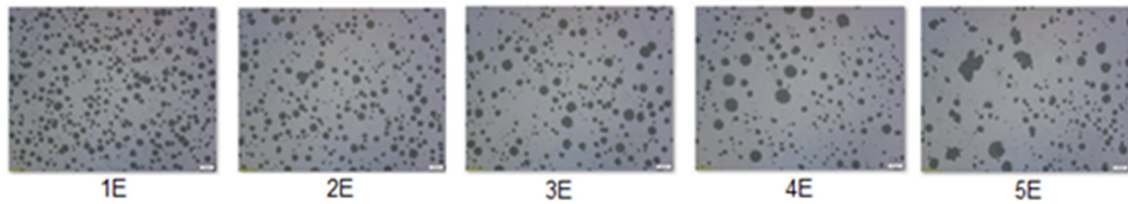
RESULTADOS					
Especificado	Região	Grau de nodularização			
		Câmara retangular		Câmara esférica	
		0,8% de liga	1,0% de liga	0,8% de liga	1,0% de liga
Grau de nodularização mínimo de 90% Fonte: ASTM A536-84	1	91%	92%	92%	93%
	2	91%	92%	91%	93%
	3	92%	91%	91%	92%
	4	90%	91%	92%	92%
	5	91%	91%	91%	91%
	6	0%	0%	10%	0%
	7	20%	30%	80%	70%
	8	0%	0%	0%	0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

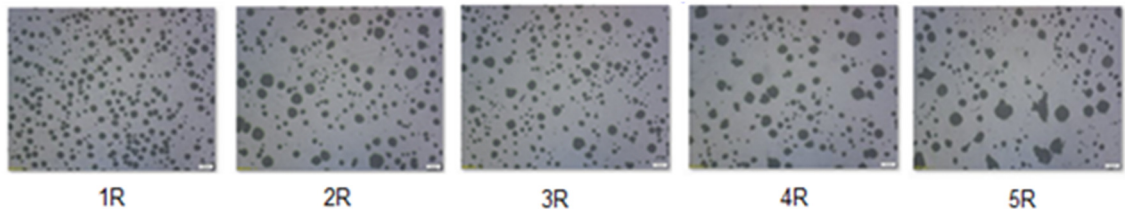
Conforme os resultados da Tabela 9, observa-se um maior grau de nodularização nas câmaras de reação e nos canais de distribuição na câmara esférica. Segundo Just; Pacyniak (2012) e Pietrowski (2009), isso se deve à forma esférica da câmara de reação que proporcionou uma melhoria no aproveitamento da

liga nodularizante. Todas as regiões do corpo de prova escalonado apresentaram grau de nodularização superior ao mínimo da norma. As Figuras 74(a), 74(b) e 75(a) e 75(b) exibem os resultados de metalografia sem ataque das seções do corpo de prova escalonado com 0,8% e 1,0% de liga nodularizante.

Figura 74: Metalografia das seções do corpo de prova escalonado com 0,8% de liga.



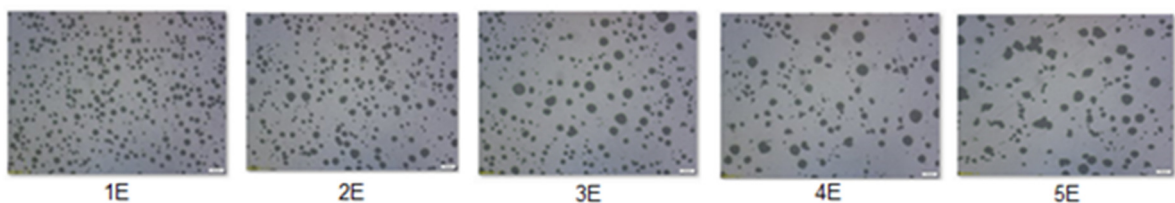
(a): câmara de reação esférica – 1, 2, 3, 4 e 5: região
E: câmara de reação na forma esférica.



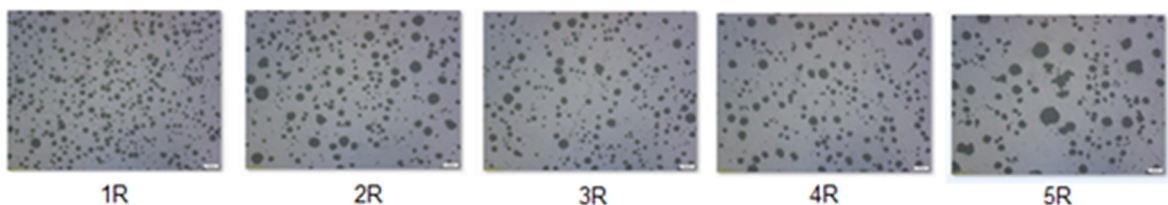
(b): câmara de reação retangular – 1, 2, 3, 4 e 5: região
R: câmara de reação na forma retangular.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 75: Metalografia das seções do corpo de prova escalonado com 1,0% de liga.



(a): câmara de reação esférica – 1, 2, 3, 4 e 5: região
E: câmara de reação na forma esférica.



(b): câmara de reação retangular – 1, 2, 3, 4 e 5: região
R: câmara de reação na forma retangular.

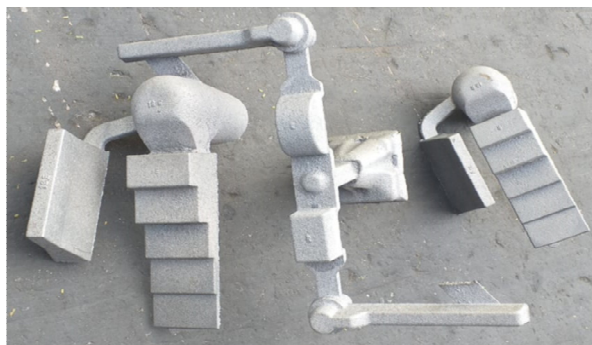
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Fusão principal

5.2.1 Características de fundição

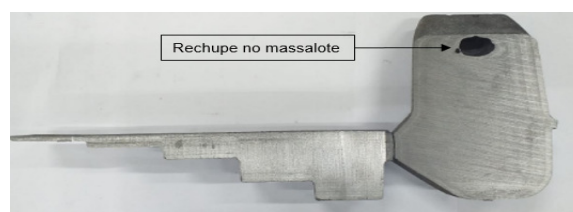
Na fusão principal não foi observada a presença de inclusões de areia e inclusões de óxidos na superfície dos corpos de prova. Os filtros tipo esponja utilizados e a forma trapezoidal da coluna de vazamento apresentaram eficácia em relação à retenção de escória, inclusões e formação de bolhas de gás. A área média da seção longitudinal das câmaras de reação garantiu a dissolução de toda a liga nodularizante sem alterar o tempo de enchimento. Segundo Costa (1995) e Abreu; Santos (1987), a precisão do cálculo é que determina a perfeita dissolução da liga nodularizante. O processo in mold apresentou segurança e viabilidade em relação ao meio ambiente pois a reação correu dentro do molde atenuando a formação de gases e explosões características da reação do magnésio durante o contato com o ferro base (JUST; PACYNIK, 2012). A Figura 76 mostra a imagem do feixe da fusão principal. Referente à solidificação, não foram observados, nas quatro condições, indícios de falha de alimentação nas regiões dos corpos de prova, conforme apresentado na Figura 77.

Figura 76: Imagem do feixe referente a fusão principal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 77: Corpo de prova escalonado e massalote seccionado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 10 mostra a composição química do ferro fundido estudado, considerando 0,8% de liga nodularizante e na Tabela 11 a composição química considerando 1,0% de liga com as faixas pretendidas para cada elemento e os resultados alcançados. Como pode ser observado, a composição química obtida apresentou-se coerente com o que foi planejado, com pequenas variações no percentual de magnésio residual e alguns elementos químicos.

Tabela 10: Análise química do feixe com 0,8% de liga nodularizante.

Amostras		Composição Química								
Tipo de câmara de reação		%C	%Si	%Mn	%Cu	%P	%S	%Sn	%Mg	%CE
Faixa pretendida		3,45	2,09	0,19	0,36	0,047	0,009	0,004	0,003	4,14
		3,83	2,38	0,25	0,43	0,059	0,012	0,007	0,041	4,64
Câmara na forma esférica	18E1	3,50	2,35	0,22	0,37	0,044	0,010	0,003	0,032	4,30
	18E2	3,48	2,38	0,19	0,36	0,052	0,011	0,003	0,030	4,29
	18E3	3,49	2,34	0,22	0,36	0,042	0,011	0,003	0,030	4,28
	18E4	3,51	2,34	0,19	0,35	0,050	0,012	0,003	0,031	4,31
	18E5	3,44	2,39	0,23	0,36	0,050	0,012	0,004	0,030	4,25
Câmara na forma retangular	18R1	3,49	2,31	0,21	0,36	0,050	0,012	0,003	0,018	4,28
	18R2	3,50	2,36	0,20	0,35	0,042	0,011	0,003	0,029	4,30
	18R3	3,48	2,38	0,22	0,37	0,042	0,011	0,003	0,032	4,29
	18R4	3,48	2,33	0,22	0,36	0,050	0,011	0,003	0,030	4,27
	18R5	3,50	2,37	0,23	0,37	0,050	0,012	0,003	0,028	4,30

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11: Análise química do feixe com 1,0% de liga nodularizante.

Amostras		Composição Química								
Tipo de câmara de reação		%C	%Si	%Mn	%Cu	%P	%S	%Sn	%Mg	%CE
Faixa pretendida		3.45	2,09	0,19	0,36	0,047	0,009	0,004	0,003	4,14
		3.83	2,38	0,25	0,43	0,059	0,012	0,007	0,041	4,64
Câmara na forma esférica	1E1	3,46	2,45	0,22	0,35	0,042	0,011	0,003	0,032	4,29
	1E2	3,46	2,44	0,22	0,35	0,038	0,011	0,003	0,030	4,29
	1E3	3,47	2,44	0,22	0,35	0,041	0,011	0,003	0,030	4,30
	1E4	3,48	2,45	0,20	0,35	0,043	0,012	0,003	0,031	4,31
	1E5	3,38	2,50	0,23	0,36	0,049	0,014	0,004	0,030	4,23
Câmara na forma retangular	1R1	3,52	2,46	0,22	0,36	0,043	0,011	0,003	0,018	4,35
	1R2	3,46	2,47	0,22	0,35	0,042	0,010	0,003	0,029	4,30
	1R3	3,45	2,47	0,22	0,36	0,040	0,010	0,003	0,032	4,29
	1R4	3,39	2,44	0,22	0,36	0,049	0,013	0,004	0,030	4,22
	1R5	3,42	2,45	0,23	0,36	0,048	0,013	0,004	0,028	4,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a análise química do feixe com 0,8% e 1,0% de liga nodularizante, verifica-

se que os teores de carbono da liga apresentaram-se levemente próximo do limite inferior desejado evidenciando apenas alguns valores fora da faixa conforme destacado nas Tabelas 10 e 11.

Os teores de alguns valores fora da faixa são explicados pelo percentual de 0,4% de silício da liga nodularizante que foi agregado na composição química.

A partir dos resultados obtidos, foi possível calcular o percentual de rendimento do magnésio por meio da seguinte equação (DRUMOND, 2010):

$$Q = P \times \frac{0,76(\%S - 0,01) + K + 1 \times 10^{-3}}{R \times \%Mg} \times \left(\frac{T}{1450} \right)^2 \quad (\text{Equação 9})$$

Onde: i) Q: quantidade, em quilogramas, da liga de magnésio; ii) P: quantidade, em quilogramas, do metal líquido a ser tratado dividido pela quantidade de câmaras de reação; iii) S: teor em enxofre do ferro fundido base; iv) K: teor residual em magnésio no ferro fundido tratado; v) t: tempo, em minutos, entre o tratamento e o vazamento da última peça; vi) T: temperatura média do metal líquido, em °C, no momento do tratamento; vii) R: rendimento do magnésio, em porcentagem, no tratamento; viii) Mg: porcentagem de magnésio na liga utilizada no tratamento.

Cálculo para 0,8% de liga nodularizante:

$$0,265 = \frac{66,91}{2} \times \frac{0,76(0,011 - 0,01) + 0,031 + 0,25 \times 10^{-3}}{\frac{R \times 5,5}{100}} \times \left(\frac{1428}{1450} \right)^2$$

Rendimento = 71%.

Cálculo para 1,0% de liga nodularizante:

$$0,335 = \frac{66,91}{2} \times \frac{0,76(0,011 - 0,01) + 0,031 + 0,25 \times 10^{-3}}{\frac{R \times 5,5}{100}} \times \left(\frac{1424}{1450} \right)^2$$

Rendimento = 56%

Em razão de utilizar menor proporção de liga nodularizante e por utilizar porcentagens iguais de magnésio na liga utilizada no tratamento, a câmara de reação com 0,8% de liga apresentou rendimento de magnésio superior em comparação com a câmara de reação com 1,0% de liga. (JUST; PACYNIK, 2012 e DRUMOND, 2010).

A fórmula para o cálculo do rendimento de magnésio é teórica e não considera o efeito da forma da câmara de reação. O tempo (t) entre o tratamento e o vazamento da última peça foi considerado 0,015 segundos pois a reação ocorreu dentro do molde.

A temperatura de sobreaquecimento e de vazamento também se apresentaram coerente com a faixa especificada. O tempo de enchimento reduziu em média 2 segundos com a modificação da coluna de vazamento na forma cilíndrica para a forma trapezoidal e alteração da área da coluna de 794mm² para 1023,2mm², conforme Apêndice A e B. A Tabela 12 mostra os resultados metalúrgicos em relação ao pretendido.

Tabela 12: Resultados metalúrgicos em relação ao pretendido.

Variáveis	Temperatura no forno (°C)		Temperatura na panela (°C)		Tempo de vazamento (s)		Vazão (kg/s)		Peso do feixe (kg)		Dimensão do extra-câmara (mm)	
	Pret.	Enc.	Pret.	Enc.	Pret.	Enc.	Pret.	Enc.	Pret.	Enc.	Pret.	Enc.
Molde 0,8% liga	1460-1480	1468	1410-1430	1428	11	12	6,5	5,96	75,6	71,6	22	19
Molde 1,0% liga		1468		1424		13		5,5		71,6	15	15

Pret.: pretendido, Enc.: encontrado

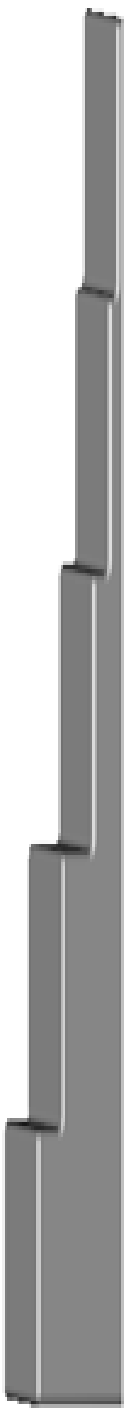
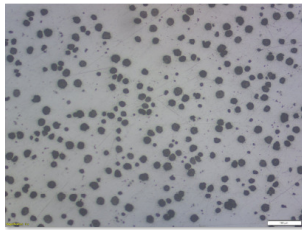
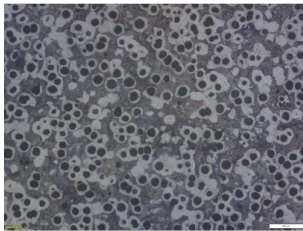
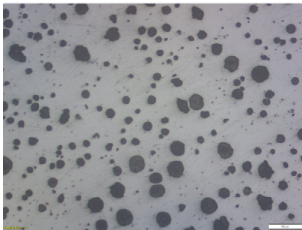
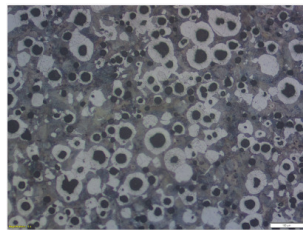
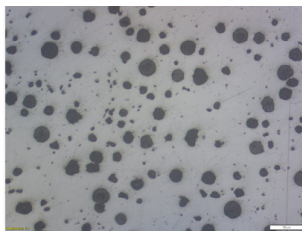
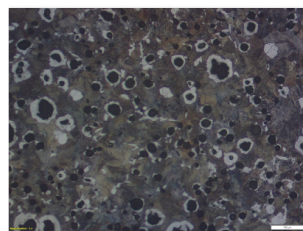
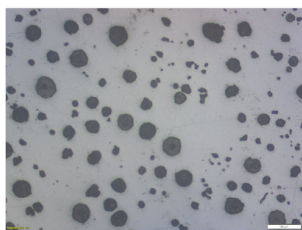
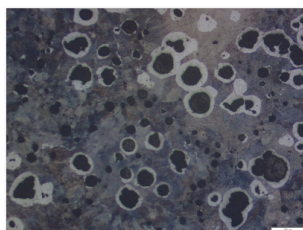
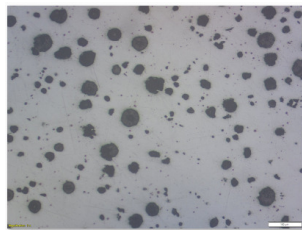
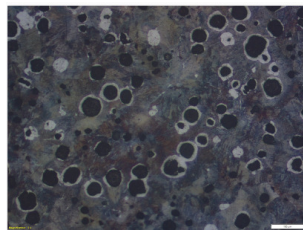
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2 Caracterização microestrutural

5.2.2.1 Análise metalográfica no corpo de prova escalonado

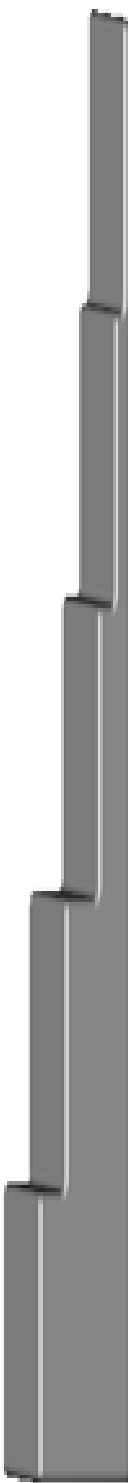
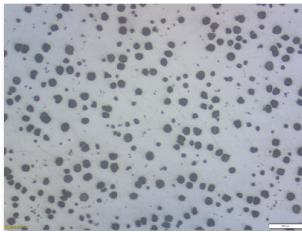
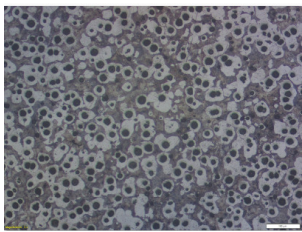
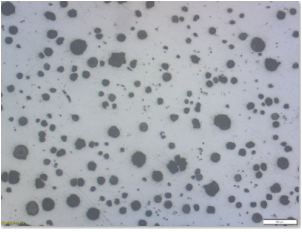
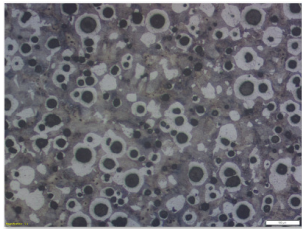
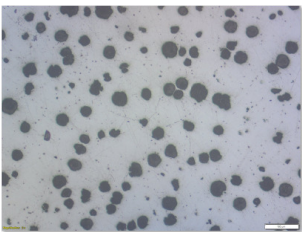
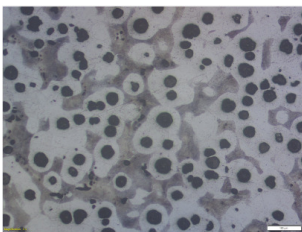
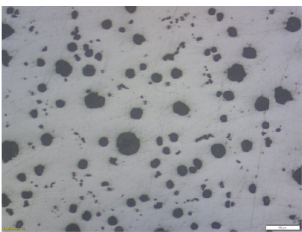
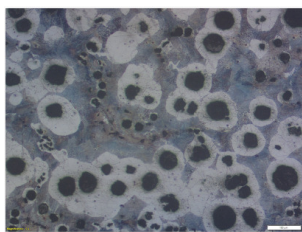
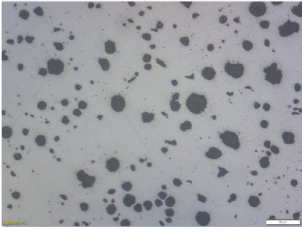
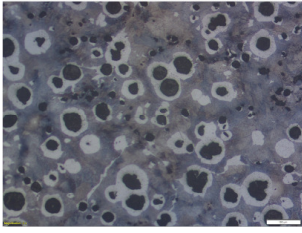
Os Gráficos 6, 7, 8 e 9 evidenciam a estrutura metalográfica sem e com ataque químico para cada condição de estudo (resultados metalográficos no corpo de prova escalonado com 0,8% e 1,0% de liga nodularizante em câmara de reação na forma retangular e em câmara de reação na forma esférica). Foi possível verificar que o grau de nodularização foi superior a 90%, variando de 91% a 93% na média de 10 imagens de amostras, segundo a Norma ASTM A247-19, caracteriza o material como um ferro fundido nodular. Considerando a variação praticamente nula, observa-se que tanto o formato da câmara como a quantidade de magnésio não influenciaram o grau de nodularização do material.

Gráfico 6: Resultados metalográficos no corpo de prova escalonado com 0,8% de liga nodularizante em câmara de reação na forma retangular.

Região	Espessura	Corpo de prova escalonado	Microestrutura com resolução de 100 μm		Análise
			Sem ataque	Com ataque	
1	5				Matriz - 60% de perlita Grafita - grau de nodularização de 93%.
2	12				Matriz - 63% de perlita Grafita - grau de nodularização de 91%.
3	25				Matriz - 82% de perlita Grafita - grau de nodularização de 92%.
4	50				Matriz - 89% de perlita Grafita - grau de nodularização de 91%.
5	70				Matriz - 91% de perlita Grafita - grau de nodularização de 92%.

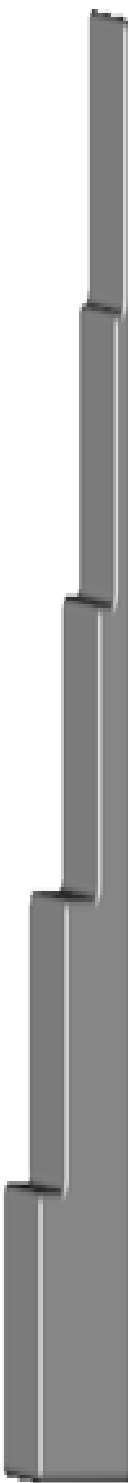
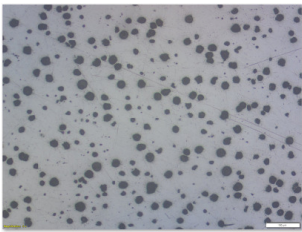
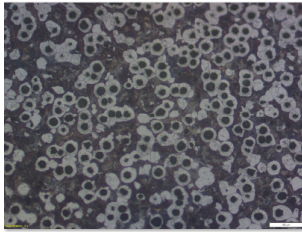
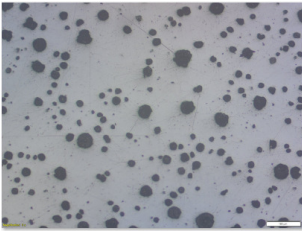
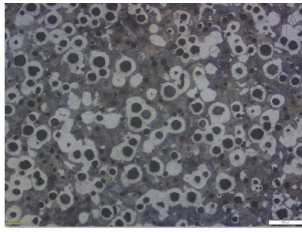
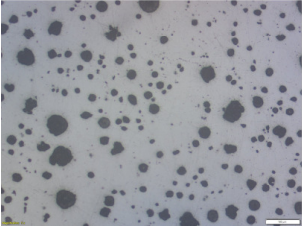
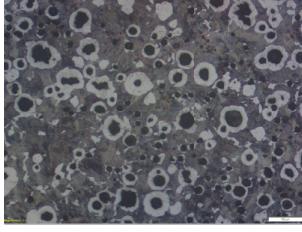
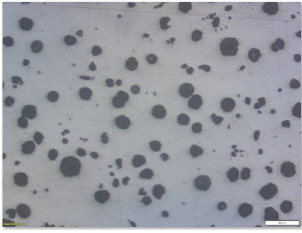
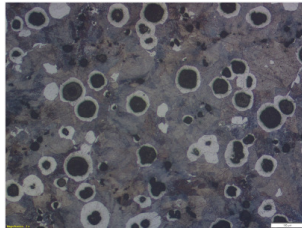
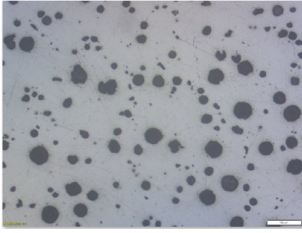
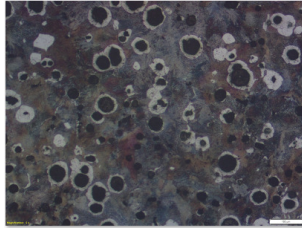
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 7: Resultados metalográficos no corpo de prova escalonado com 1% de liga nodularizante em câmara de reação na forma retangular.

Região	Espessura	Corpo de prova escalonado	Microestrutura com resolução de 100 μm		Análise
			Sem ataque	Com ataque	
1	5				Matriz - 56% de perlita Grafita - grau de nodularização de 93%.
2	12				Matriz - 72% de perlita Grafita - grau de nodularização de 92%.
3	25				Matriz - 40% de perlita Grafita - grau de nodularização de 93%.
4	50				Matriz - 68% de perlita Grafita - grau de nodularização de 92%.
5	70				Matriz - 85% de perlita Grafita - grau de nodularização de 93%.

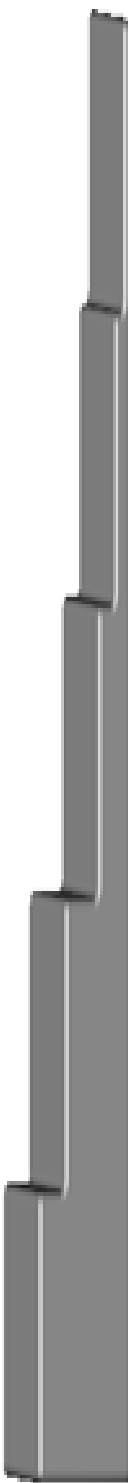
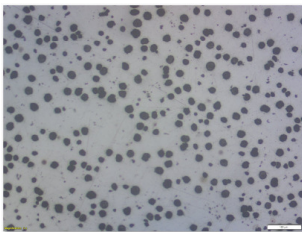
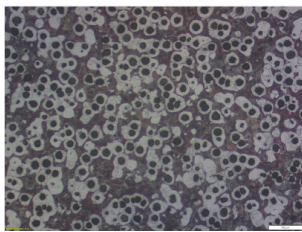
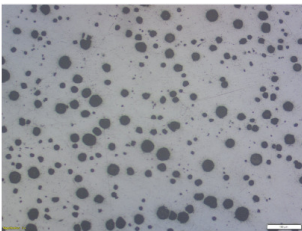
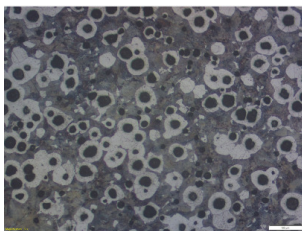
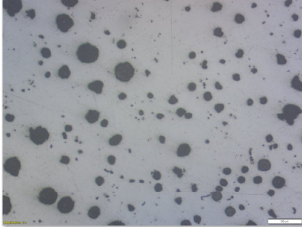
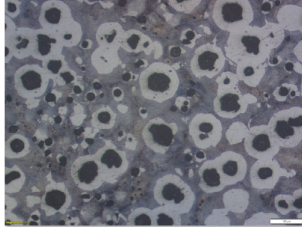
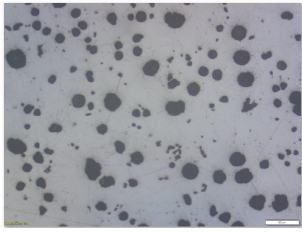
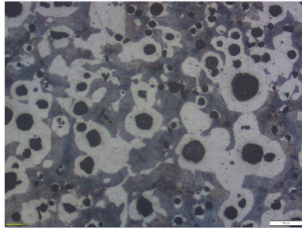
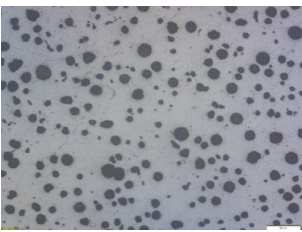
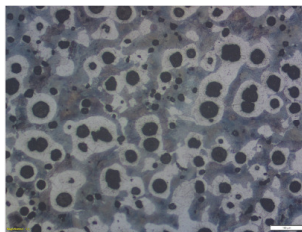
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 8: Resultados metalográficos no corpo de prova escalonado com 0,8% de liga nodularizante em câmara de reação esférica.

Região	Espessura	Corpo de prova escalonado	Microestrutura com resolução de 100 μm		Análise
			Sem ataque	Com ataque	
1	5				Matriz - 61% de perlita Grafita - grau de nodularização de 93%.
2	12				Matriz - 65% de perlita Grafita - grau de nodularização de 92%.
3	25				Matriz - 77% de perlita Grafita - grau de nodularização de 92%.
4	50				Matriz - 85% de perlita Grafita - grau de nodularização de 92%.
5	70				Matriz - 82% de perlita Grafita - grau de nodularização de 92%.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 9: Resultados metalográficos no corpo de prova escalonado com 1% de liga nodularizante em câmara de reação esférica.

Região	Espessura	Corpo de prova escalonado	Microestrutura com resolução de 100 μm		Análise
			Sem ataque	Com ataque	
1	5				Matriz - 56% de perlita Grafita - grau de nodularização de 93%.
2	12				Matriz - 65% de perlita Grafita - grau de nodularização de 93%.
3	25				Matriz - 58% de perlita Grafita - grau de nodularização de 93%.
4	50				Matriz - 66% de perlita Grafita - grau de nodularização de 92%.
5	70				Matriz - 58% de perlita Grafita - grau de nodularização de 92%.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação à matriz metálica, conforme análise metalográfica por microscopia óptica, esta apresentou uma média de aproximadamente 40% a 91% de perlita. A redução no percentual de perlita para a câmara retangular com 1,0% de liga pode ser explicado pelo percentual de silício na faixa máxima da análise química apresentado na Tabela 11 (ASM HANDBOOK, 2008). A composição química da liga nodularizante provoca em média um acréscimo de 0,4% de silício na análise química. Corpos de prova vazados com 1% de liga nodularizante incorporaram quantidade maior de silício em relação aos corpos de prova vazados com 0,8% de liga nodularizante.

Em relação à matriz, foi observado que, para o ferro fundido nodular produzido com 0,8% de liga nodularizante em câmara retangular, a proporção de perlita aumentou com a espessura da região. Uma tendência de comportamento nesse sentido também foi verificada para o material com 1% de liga nessa mesma câmara e para o ferro fundido produzido com 0,8% de liga em câmara esférica. Este comportamento não foi observado para câmara de reação na forma esférica com 1% de liga pois, conforme demonstrado na Tabela 11, apresenta valores de silício acima da faixa máxima. O silício reduz a estabilidade da cementita, aumentando a diferença entre as temperaturas eutéticas estável e metaestável, favorecendo assim sua decomposição em grafita e ferrita, sendo denominado um elemento grafitizante (GUESSER, 2009). A quantidade maior de perlita nas regiões de maior espessura pode ser explicado por dois fatores (JUST; PACYNIK, 2012 e PIETROWSKI, 2009):

i) pelo tempo de desmoldagem, que foi equivalente a 30 minutos, pois seguiu o tempo de ciclo da linha de moldagem. As regiões de menor espessura resfriaram no molde com a presença de areia silico argilosa sintética. As regiões de maior espessura estavam em processo de resfriamento durante a desmoldagem e sofreram um pequeno “choque térmico”;

ii) visualmente, as regiões de menor espessura contém maior quantidade de nódulos do que as regiões de maior espessura e, como cada nódulo é envolto por uma camada de ferrita, seu percentual é maior nas espessuras mais finas. A forma da câmara de reação tem influência somente na quantidade de grafita e com relação a forma de precipitados de grafita, esta não tem influência significativa acima de 90% de grau de nodularização.

A variação na espessura do corpo de prova escalonado afetou o tamanho da grafita, ou seja, o aumento na velocidade de resfriamento diminui o tamanho da grafita em seções finas e quanto menor a velocidade de resfriamento, maior o tamanho da

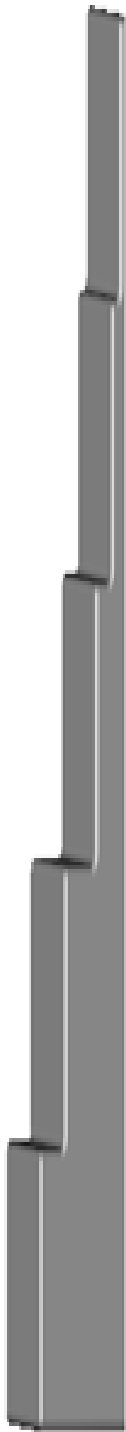
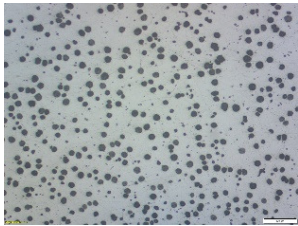
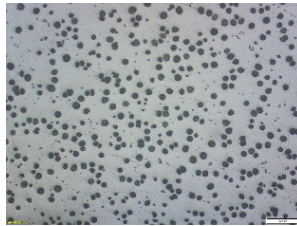
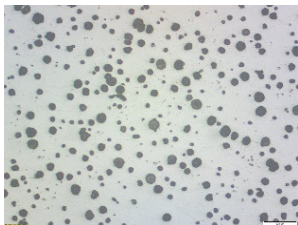
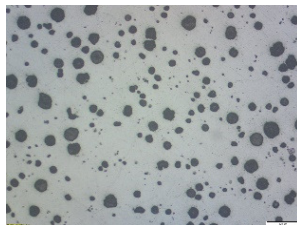
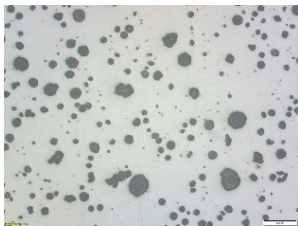
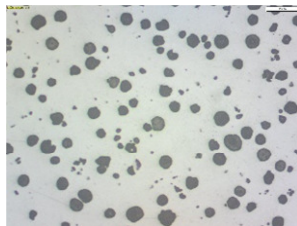
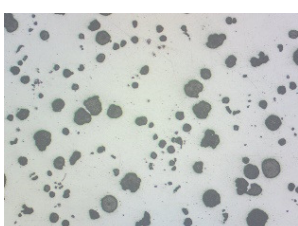
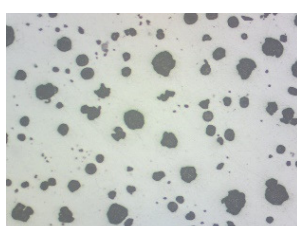
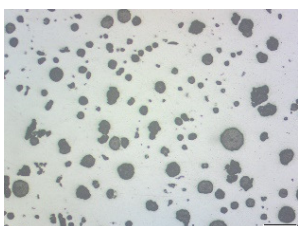
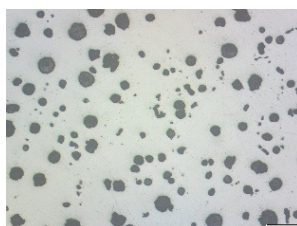
grafita, o que ocorre em seções espessas, mas não altera o percentual de nodularização. O grau de nodularização é comprometido pelo percentual de magnésio residual e pela forma da câmara de reação para valores inferiores a 90% de esferoidização (KAMIŃSKA et al. 2018 e PIETROWSKI, 2009).

Os Gráficos 10 e 11 apresentam a estrutura metalográfica sem ataque químico com tamanho e quantidade de nódulos por milímetro quadrado na média de 3 imagens de amostras para cada espessura do corpo de prova escalonado nas condições de estudo (resultados metalográficos no corpo de prova escalonado com 0,8% e 1,0% de liga nodularizante em câmara de reação na forma retangular e em câmara de reação na forma de tampa esférica), segundo a Norma BS EN ISO 945-1:2019 que especifica a microestrutura de ferros fundidos nodulares com classificação da grafita por análise visual. O número de nódulos é definido como o número de partículas de grafita por unidade de área. A terminologia usualmente utilizada é número de nódulos/mm² examinados em uma superfície polida ao microscópio com ampliação de 100X (MULLINS, 2003). Nas quatro condições de estudo, observa-se aumento do número de nódulos por milímetro quadrado e tamanho menor com a redução da espessura do corpo de prova escalonado e o aumento da espessura provoca redução da quantidade de nódulos. Segundo Kamińska et al. (2018) e Pietrowski (2009), a quantidade de nódulos está relacionada com a velocidade de resfriamento do ferro fundido nodular. A redução na espessura de parede provoca aumento na velocidade de resfriamento resultando em refino da microestrutura e consequentemente aumento do número de nódulos. O tamanho da grafita permaneceu inalterado para espessuras acima de 25mm em consequência da redução da velocidade de resfriamento para câmara de reação na forma retangular e de tampa esférica com 0,8% e 1,0% de liga nodularizante. Este comportamento também foi observado nos estudos desenvolvidos por Costa (1995).

Em câmara de reação na forma de tampa esférica observa-se em geral, quantidade de nódulos superior em relação a câmara retangular. Segundo Just e Pacyniak (2012) a forma de tampa esférica, devido ao seu formato, favorece maior número de nódulos de grafita garantindo movimentação uniforme do fluxo de metal na câmara de reação.

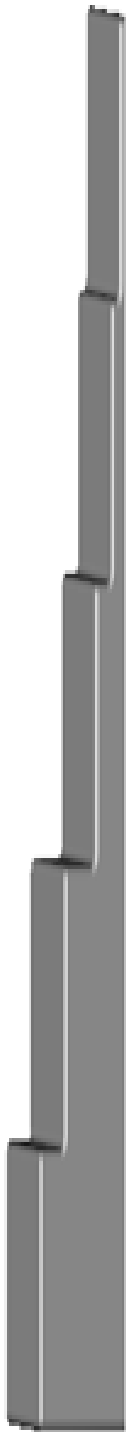
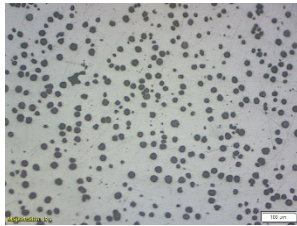
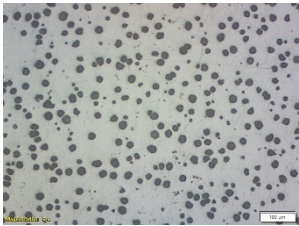
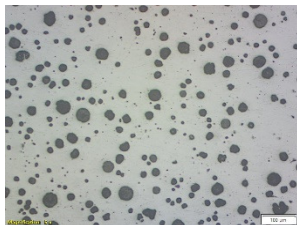
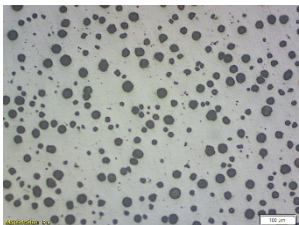
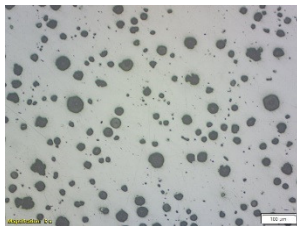
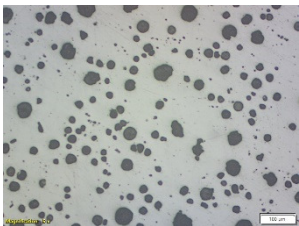
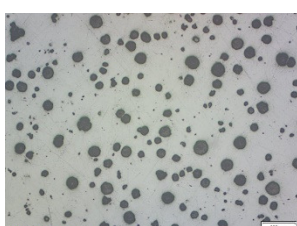
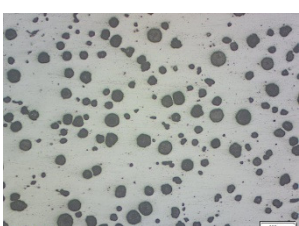
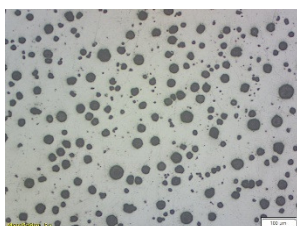
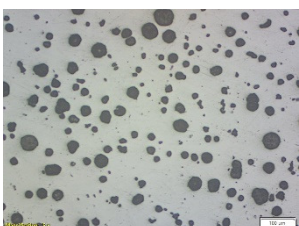
O efeito do aumento no número de nódulos na qualidade da peça fundida está relacionado com a melhor homogeneização da estrutura, o que favorece resultados de propriedades mecânicas e metalúrgicas (MELO e CARMO, 1992).

Gráfico 10: Resultados de contagem e tamanho de nódulos no corpo de prova escalonado com 0,8% e 1,0% de liga nodularizante em câmara de reação na forma retangular.

Região		Espessura	Corpo de prova escalonado	Microestrutura com resolução de 100 μm			
				0,8% de liga nodularizante		1,0% de liga nodularizante	
1	5			Nódulos mm²: 702		Nódulos mm²: 719	
				Tamanho: 6-7		Tamanho: 6-7	
2	12			Nódulos mm²: 431		Nódulos mm²: 439	
				Tamanho: 6-7		Tamanho: 6-7	
3	25			Nódulos mm²: 333		Nódulos mm²: 249	
				Tamanho: 5-6		Tamanho: 5-6	
4	50			Nódulos mm²: 219		Nódulos mm²: 203	
				Tamanho: 5-6		Tamanho: 5-6	
5	70			Nódulos mm²: 250		Nódulos mm²: 231	
				Tamanho: 5-6		Tamanho: 5-6	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 11: Resultados de contagem e tamanho de nódulos no corpo de prova escalonado com 0,8% e 1,0% de liga nodularizante em câmara de reação esférica.

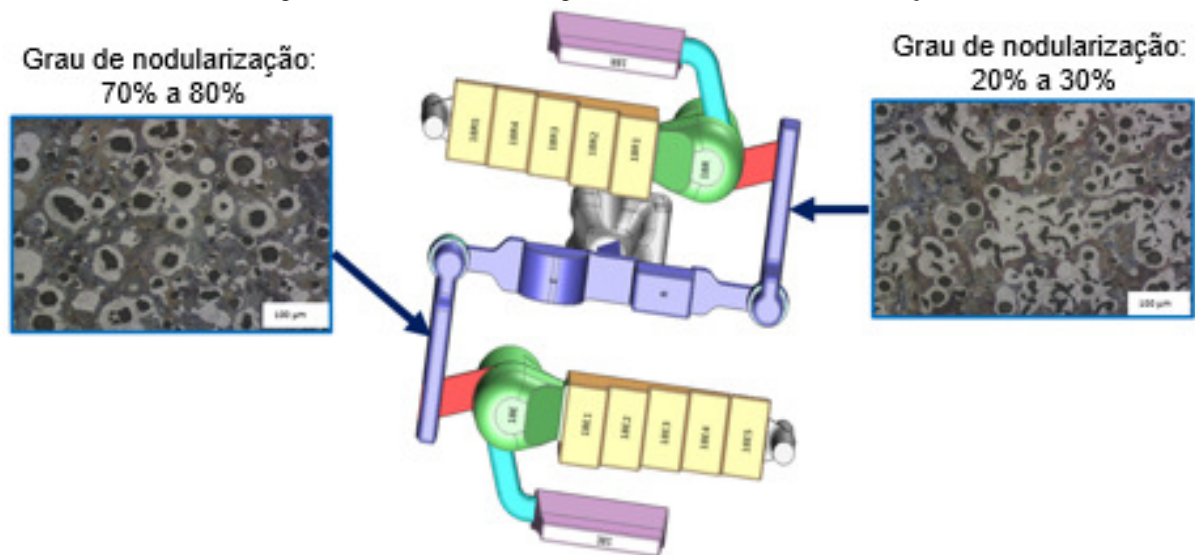
Região		Espessura	Corpo de prova escalonado	Microestrutura com resolução de 100 μm			
				0,8% de liga nodularizante		1,0% de liga nodularizante	
1	5			Nódulos mm^2 : 706		Nódulos mm^2 : 721	
				Tamanho: 6-7		Tamanho: 6-7	
2	12			Nódulos mm^2 : 435		Nódulos mm^2 : 392	
				Tamanho: 6-7		Tamanho: 6-7	
3	25			Nódulos mm^2 : 401		Nódulos mm^2 : 372	
				Tamanho: 5-6		Tamanho: 5-6	
4	50			Nódulos mm^2 : 311		Nódulos mm^2 : 303	
				Tamanho: 5-6		Tamanho: 5-6	
5	70			Nódulos mm^2 : 451		Nódulos mm^2 : 414	
				Tamanho: 5-6		Tamanho: 5-6	

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2.2 Análise metalográfica nos canais de distribuição

Amostras com ataque químico foram retiradas da região central dos canais de distribuição sendo uma imagem no canal do lado da câmara retangular e uma imagem do lado da câmara esférica para 0,8% e 1,0% de liga nodularizante. Observa-se uma tendência de comportamento similar aos resultados apresentados da primeira fusão para o ajuste das variáveis de processo. Foi possível observar que no canal que representa a câmara esférica apresentou grau de modularização de 70% a 80% e no lado da câmara retangular, grau de modularização de 20% a 30% conforme evidenciado na Figura 78.

Figura 78: Análise metalográfica nos canais de distribuição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

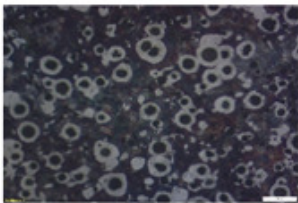
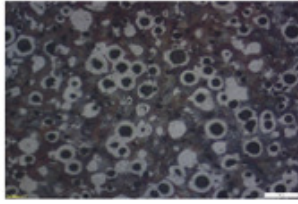
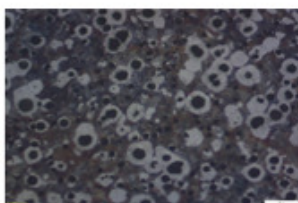
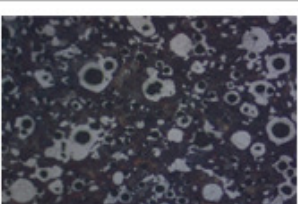
Em câmara na forma esférica, devido ao seu formato, os grãos de liga nodularizante se arrastam de maneira uniforme promovendo um movimento de rotação constante em todas as regiões da câmara de reação, por esta razão apresentou grau de nodularização superior em relação aos resultados apresentados no canal que representa a câmara retangular (PIETROWSKI, 2009).

5.2.2.3 Análise metalográfica no corpo de prova de tração

Para comprovar os resultados metalográficos apresentados no corpo de prova

escalonado, amostras foram retiradas de uma região do corpo de prova usinado de diâmetro de 10mm, que corresponde a uma espessura de 25mm da região bruta do corpo de prova de tração. Foi possível verificar que o grau de nodularização foi superior a 90%, variando de 92% a 93% na média de 10 imagens de amostras, segundo a Norma ASTM A247-19. O Gráfico 12 evidencia a estrutura metalográfica no corpo de prova de tração para as 4 condições de vazamento.

Gráfico 12: Metalografia no corpo de prova de tração para as quatro condições de vazamento.

	Microestrutura	Análise
	Amostras com ataque	
Câmara de reação retangular com 0,8% de liga		Matriz – 71% de perlita Grafita – grau de nodularização de 92%.
Câmara de reação retangular com 1,0% de liga		Matriz – 72% de perlita Grafita – grau de nodularização de 93%.
Câmara de reação esférica com 0,8% de liga		Matriz – 68% de perlita Grafita – grau de nodularização de 93%.
Câmara de reação esférica com 1,0% de liga		Matriz – 70% de perlita Grafita – grau de nodularização de 92%.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação à matriz metálica, conforme análise metalográfica por microscopia óptica, esta apresentou aproximadamente 68% a 72% de perlita, ou seja, não foram observadas alterações pronunciadas quanto à matriz com a variação da geometria da câmara e com as quantidades de liga nodularizante investigadas.

5.2.3 Ensaio de dureza

5.2.3.1 Ensaio de dureza no corpo de prova escalonado

A Tabela 13 indica os 3 valores de dureza, a média e o desvio padrão para cada espessura do corpo de prova escalonado para as câmaras de reação na forma retangular e esférica com 0,8% e a Tabela 14, os resultados com 1,0% de liga nodularizante.

Tabela 13: Resultados de dureza Brinell com 0,8% de liga nodularizante.

DUREZA BRINELL (HB)										
Percentual de liga	0,8%									
Forma da câmara	Esférica					Retangular				
Especificado	190HB a 250 HB									
Espessuras	Valores			Média	σ	Valores			Média	σ
70mm	207	211	202	207	4,5	207	198	202	202	4,5
50mm	217	212	207	212	5,0	223	212	217	217	5,5
25mm	229	225	228	227	2,1	255	248	241	248	7,0
12mm	229	235	241	235	6,0	255	255	241	250	8,1
5mm	241	248	241	243	4,0	262	255	248	255	7,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

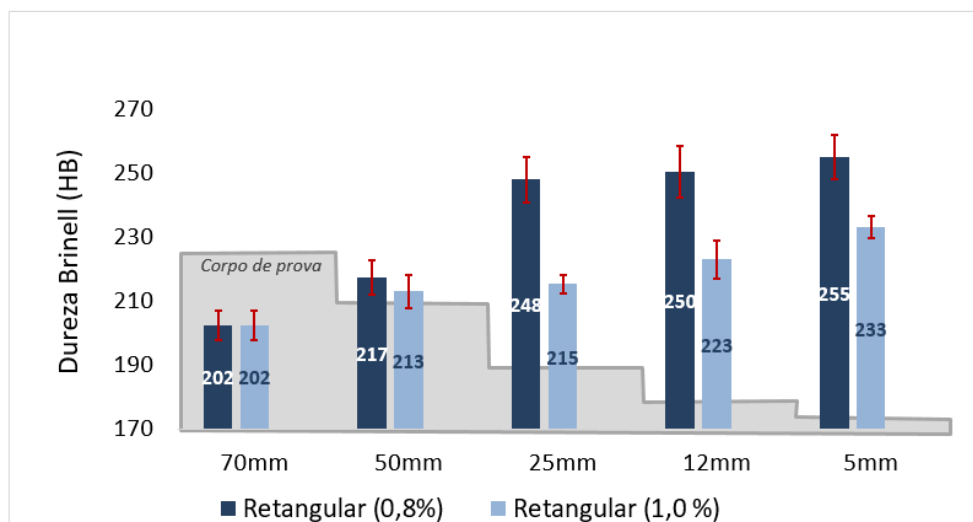
Tabela 14: Resultados de dureza Brinell com 1,0% de liga nodularizante.

DUREZA BRINELL (HB)										
Percentual de liga	1,0%									
Forma da câmara	Esférica					Retangular				
Especificado	190HB a 250 HB									
Espessuras	Valores			Média	σ	Valores			Média	σ
70mm	192	192	202	195	6,0	191	202	212	202	10,5
50mm	207	206	207	207	0,6	217	207	215	213	5,3
25mm	207	207	207	207	0,0	217	212	217	215	2,9
12mm	211	211	207	210	2,0	223	229	217	223	6,0
5mm	212	212	217	214	3,0	235	229	235	233	3,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

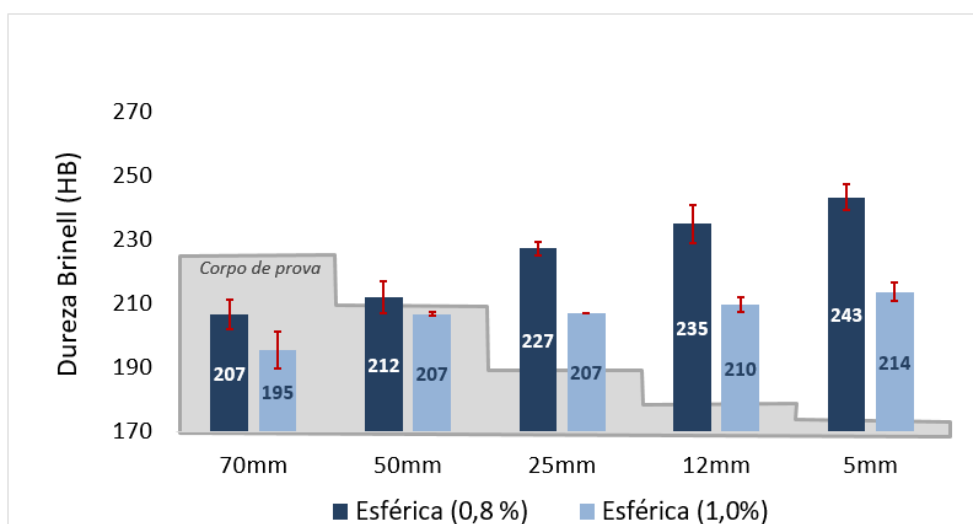
Os Gráficos 13 e 14 indicam a média de 3 ensaios de dureza para cada espessura do corpo de prova escalonado com 0,8% e 1,0% de liga nodularizante com testes em câmaras de reação na forma retangular e esférica respectivamente.

Gráfico 13: Resultados de dureza em corpo de prova escalonado para câmara retangular.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 14: Resultados de dureza em corpo de prova escalonado para câmara esférica.

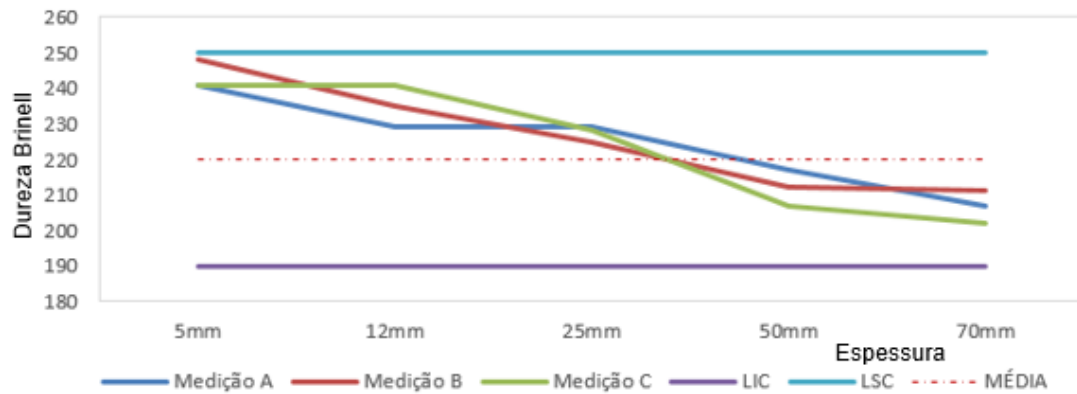


Fonte: Elaborado pelo autor.

Por apresentar maior velocidade de resfriamento, as regiões de menor espessura apresentam valores de dureza superior às regiões de maior espessura para as formas de câmara de reação retangular e esférica (KAMIŃSKA et al. 2018). Observa-se valores de dureza para câmaras de reação retangular e esférica com 0,8% de liga superiores aos valores de dureza com 1% de liga para as duas câmaras de reação. Este resultado pode ser explicado pela redução no percentual de perlita em consequência de valores de silício na faixa máxima da análise química apresentado na Tabela 11 (ASM HANDBOOK, 2008). O comportamento dos ensaios de dureza considerando a faixa especificada pode ser observado nos Gráficos

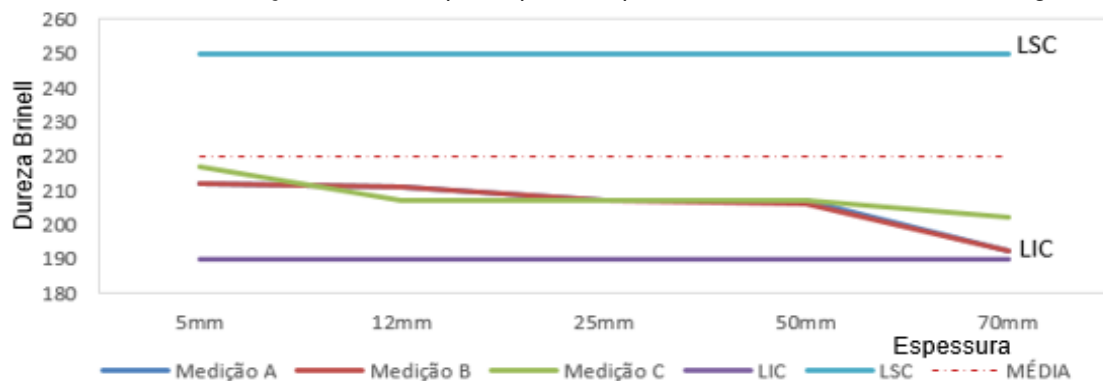
15,16,17 e 18. Todos os valores se apresentaram dentro da faixa especificada com pequenas variações para câmara de reação na forma retangular com 0,8% de liga.

Gráfico 15: Variação da dureza por espessura para câmara esférica com 0,8% de liga.



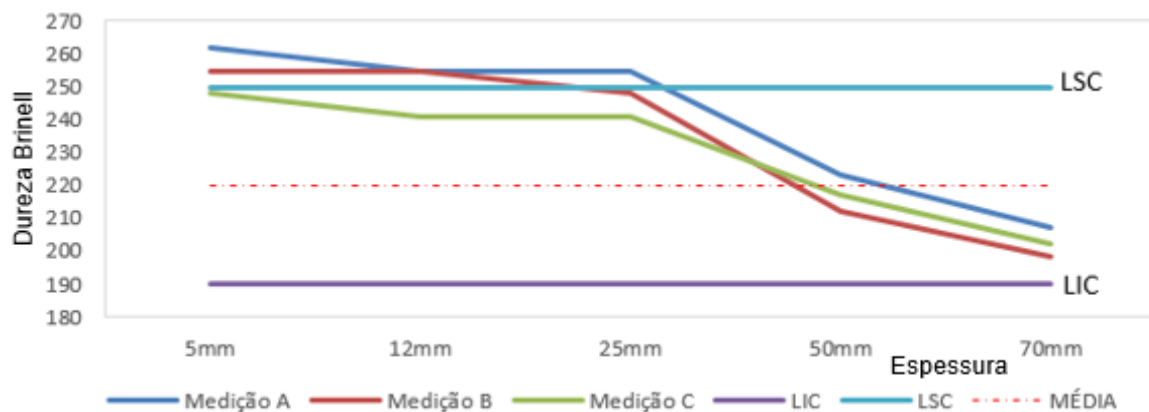
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 16: Variação da dureza por espessura para câmara esférica com 1% de liga.



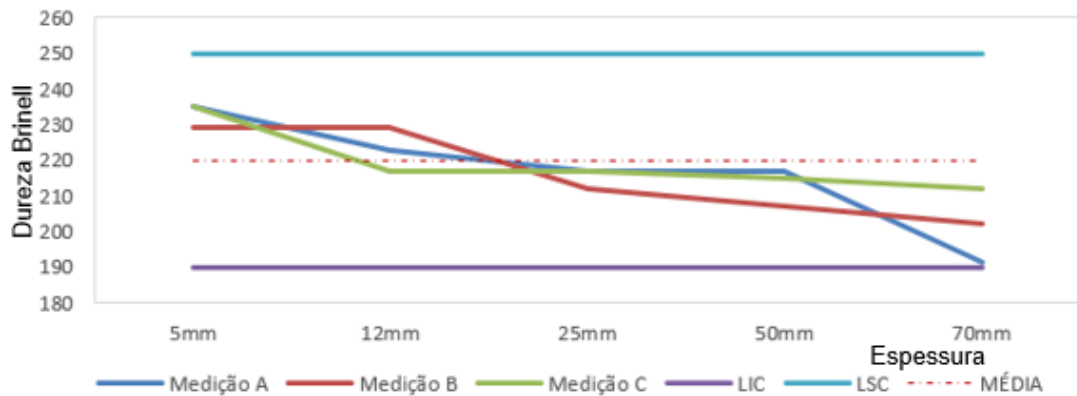
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 17: Variação da dureza por espessura para câmara retangular com 0,8% de liga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 18: Variação da dureza por espessura para câmara retangular com 1% de liga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.3.2 Ensaio de dureza no corpo de prova de tração

As Tabelas 15, 16, 17 e 18 indicam as comparações das médias dos valores de dureza em cada espessura do corpo de prova escalonado e o corpo de prova de tração.

Para as quatro condições de teste, os valores de dureza nos corpos de prova de tração comprovam a efetividade da dureza nos corpos de prova escalonado, apresentando dentro da faixa especificada pretendida.

Tabela 15: Comparação da dureza nos corpos de prova escalonado e de tração para câmara esférica com 0,8% de liga.

DUREZA BRINELL (HB)						
Percentual de liga	0,8%					
Forma da câmara	Esférica					
Especificado	190HB a 250 HB					
	Corpo de prova escalonado			Corpo de prova de tração		
Espessuras	Valores			Valores	Média	
70mm	207	211	202	218-218-219	218	
50mm	217	212	207			
25mm	229	225	228			
12mm	229	235	241			
5mm	241	248	241			

Fonte: Dados da pesquisa.

Tabela 16: Comparação da dureza nos corpos de prova escalonado e de tração para câmara esférica com 1,0% de liga.

DUREZA BRINELL (HB)						
Percentual de liga	1,0%					
Forma da câmara	Esférica					
Especificado	190HB a 250 HB					
	Corpo de prova escalonado			Corpo de prova de tração		
Espessuras	Valores			Média	Valores	Média
70mm	192	192	202	195	223-226-225	225
50mm	207	206	207	207		
25mm	207	207	207	207		
12mm	211	211	207	210		
5mm	212	212	217	214		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17: Comparação da dureza nos corpos de prova escalonado e de tração para câmara retangular com 0,8% de liga.

DUREZA BRINELL (HB)						
Percentual de liga	0,8%					
Forma da câmara	Retangular					
Especificado	190HB a 250 HB					
	Corpo de prova escalonado			Corpo de prova de tração		
Espessuras	Valores			Média	Valores	Média
70mm	207	198	202	202	215-217-215	216
50mm	223	212	217	217		
25mm	255	248	241	248		
12mm	255	255	241	250		
5mm	262	255	248	255		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18: Comparação da dureza nos corpos de prova escalonado e de tração para câmara retangular com 1,0% de liga.

DUREZA BRINELL (HB)						
Percentual de liga	1,0%					
Forma da câmara	Retangular					
Especificado	190HB a 250 HB					
	Corpo de prova escalonado			Corpo de prova de tração		
Espessuras	Valores			Média	Valores	Média
70mm	192	192	202	195	218-219-222	220
50mm	207	206	207	207		
25mm	207	207	207	207		
12mm	211	211	207	210		
5mm	212	212	217	214		

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.4 Ensaio de tração

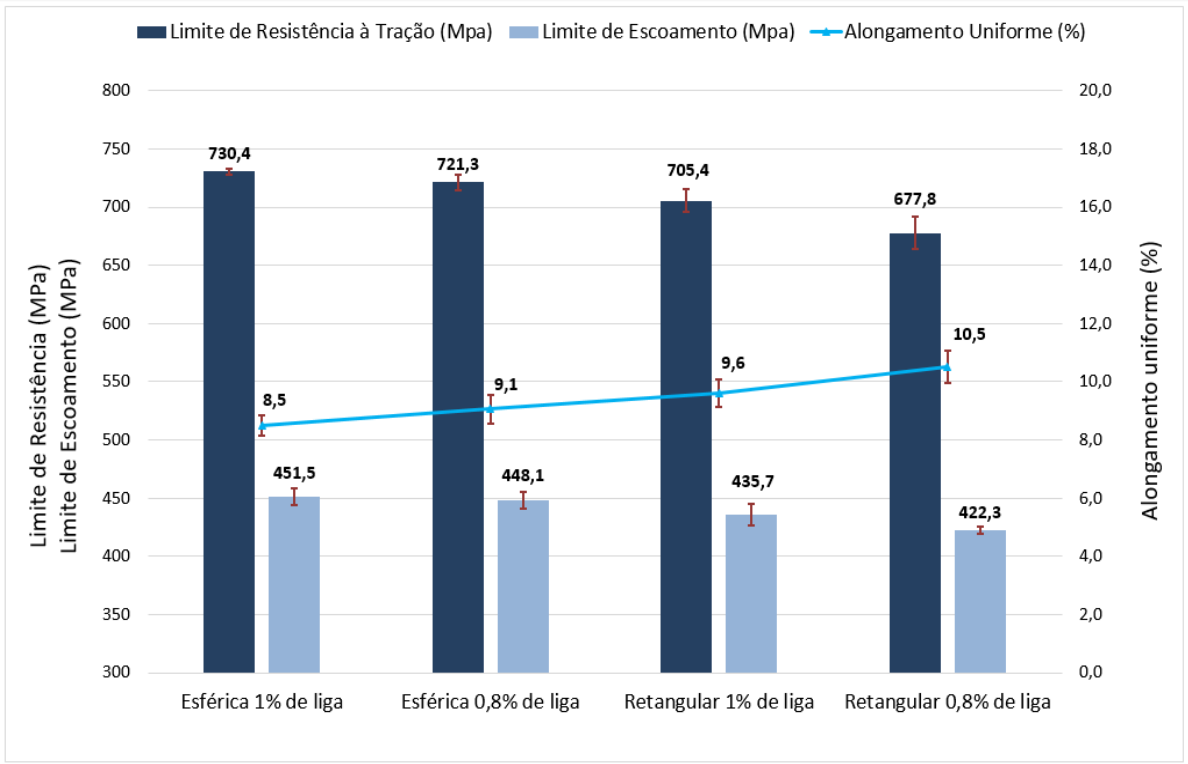
Na Tabela 19 são apresentados os valores de limite de resistência, limite de escoamento e alongamento % obtidos a partir do ensaio de tração e os valores especificados conforme a norma ASTM A536-84 (2019), grau 80-55-06. Os resultados obtidos são mostrados no Gráfico 19.

Tabela 19: Resultados de propriedades mecânicas.

PROPRIEDADES MECÂNICAS					
Percentual de liga		0,8%		1,0%	
Forma da câmara de reação		Esférica	Retangular	Esférica	Retangular
Propriedades	Especificado				
Carga aplicada (N)		20.132	19.533	20.731	19.563
Limite de Resistência à Tração (MPa)	552	721,3	677,8	730,4	705,4
Limite de Escoamento (MPa)	379	448,1	422,3	451,5	435,7
Alongamento (%)	6	9,1	10,5	8,5	9,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 19: Resultados de propriedades mecânicas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que, para as duas formas de câmaras de reação, retangular e esférica e para as quantidades de liga nodularizante, de 0,8% e 1,0%, os resultados de limite de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento percentual foram superiores aos valores especificados na norma ASTM A536, grau 80-55-06.

De maneira geral, observou-se uma leve tendência para câmaras de reação na forma esférica de aumento da resistência mecânica e limite de escoamento para 0,8% e 1% de liga nodularizante. Segundo Pietrowski (2009), a câmara de reação na forma esférica, devido ao seu formato, garante um movimento de rotação do metal líquido em todas as regiões e, por esta razão, obtêm-se um processo de nodularização mais eficiente garantindo a forma nodular da grafita e a quantidade de nódulos.

6 CONCLUSÕES

A obtenção e a qualidade (microestrutura e propriedades mecânicas) dos ferros fundidos nodulares estão diretamente relacionadas ou dependentes do tratamento de nodularização.. Neste trabalho foi estudado, no processo *in mold*, o efeito das formas e dimensões da câmara de reação retangular e esférica, além da alteração na proporção de liga nodularizante. A partir da análise de dados obtidos, conclui-se que:

- O cálculo do dimensionamento da área média da seção longitudinal da câmara de reação é fator primordial para garantir uma perfeita reação da liga nodularizante independente da forma da câmara de reação;
- No processo *in mold*, a formação de gases é atenuada e a parte pirotécnica (explosões características da reação do magnésio durante o contato com o ferro base) inexistente nesse processo, pois a reação ocorre dentro do molde;
- Um aumento de 28% na área da coluna de vazamento e a alteração na forma da seção de circular para trapezoidal garantiram o tempo de enchimento dentro da faixa pretendida e os corpos de prova não apresentaram inclusões e porosidades;
- Para câmara de reação na forma esférica, observou-se que o percentual de nodularização dentro da câmara e nos canais de distribuição foi superior em comparação com a câmara retangular, garantindo o grau de nodularização especificada nos corpos de prova. Isso se deve à forma esférica da câmara de reação o que proporcionou uma melhoria no aproveitamento da liga nodularizante;
- A obtenção de ferro fundido nodular com a nodularização *in mold* no experimento realizado mostrou-se eficiente em relação aos resultados de microestrutura, apresentando grau de nodularização superior a 90% em todas as espessuras do corpo de prova escalonado para as duas formas de câmaras de reação, caracterizando o material como ferro fundido nodular;
- Os resultados metalográficos realizados no corpo de prova de tração para as quatro condições de vazamento mostraram comportamentos semelhantes aos resultados apresentados no corpo de prova escalonado atendendo os critérios da norma ASTM A247-19;
- Os valores da média de durezas obtidos no corpo de prova de tração apresentaram-se dentro da faixa especificada, comprovando a efetividade

dos valores de dureza realizados no corpo de prova escalonado para as quatro condições de vazamento;

- As regiões de menor espessura do corpo de prova escalonado apresentaram valores de dureza superiores às regiões de maior espessura para as quatro condições de vazamento por apresentar maior velocidade de resfriamento;
- Para as duas formas de câmaras de reação, retangular e esférica, e para as quantidades de liga de 0,8% e 1,0% resultados de limite de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento percentual foram superiores aos valores especificados na norma ASTM A536-84 (2019), grau 80-55-06, o que caracteriza o material como ferro fundido nodular.
- A forma esférica da câmara de reação proporcionou um movimento de rotação uniforme dos grãos de liga de magnésio, o que melhorou a eficiência do tratamento de nodularização. Por esta razão, apresentou resultados de limite de resistência e limite de escoamento superiores aos resultados da câmara de reação na forma retangular.
- Em razão de utilizar menor proporção de liga nodularizante, a câmara de reação com 0,8% de liga apresentou rendimento de magnésio superior em comparação com a câmara de reação com 1,0% de liga.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Em relação à matriz metálica, determinar o espaçamento interlamelar médio da perlita, tamanho de grão médio de ferrita e formação de drosses, utilizando microscopia eletrônica de varredura MEV, comparando os resultados com o processo de nodularização *in mold* utilizando câmara de reação retangular e esférica.
2. Utilizar a técnica de análise térmica para o processo de nodularização *in mold* para avaliar os principais pontos de inflexão das curvas de resfriamento, vislumbrando características específicas das microestruturas e propriedades mecânicas dessas ligas.
3. Avaliar a aplicabilidade da técnica *in mold* na produção de peças não seriadas.
4. Avaliar outras formas geométricas para as câmaras de reação usando software de simulação computacional (MAGMASOFT®) e avaliando as melhores soluções através da fundição de corpos de prova.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A.G.S; SANTOS, C.P. **Determinação dos sistemas de massalotes e canais**, 2. ed. Belo Horizonte, DFP/DAT, v. 5, p. 9-99, 1987.

ANUÁRIO ABIFA 2019: GUIA ABIFA DE FUNDIÇÃO, http://abifa.org.br/revista15/_abifa_212.pdf, 2019.

AKINRIBIDE, O.J.; OLUSUNLE, S.O.O.; AKINWAMIDE, S.O.; BABALOLA, B.J.; OLUBAMBI, P.A. **Impact of heat treatment on mechanical and tribological behaviour of unalloyed and alloyed ductile iron**, Journal of Materials Research and Technology, v. 14, p. 1809-1819, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A-247-19**: Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A-532/A 532M**: - Standard Specification for abrasion-resistant cast irons. West Conshohocken, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A-536-84**: - Standard Specification for Ductile Iron Castings. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8 / E8M-16^a** - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. STANDARD by ASTM International, 2016.

ANJOS, V.E.A. **Use of thermal analysis to control the solidification morphology of nodular cast irons and reduce feeding needs**, Tese de D.Sc., Universität Duisburg-Essen, Essen, Alemanha, 2015.

ANJOS, V.; BAUMGART, W. and CUNHA, J. **Grundlagen der Thermischen Analyse**, in OCC Seminar - Metallurgische Regelkreise, Mönchengladbach, v. 5, p. 5-12, 2014.

ASM HANDBOOK. **Castings, International**, v. 15, p. 54-55, 317-327, 835, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6914**: - ferro fundido maleável, p.1-12, 2017.

BARTON, R. Bcira **Confidencial Report** 1188, v. 1, p. 3-5, 1975.

BARTON, R. BCIRA **Confidencial Report** 1350, v. 1, p. 3-5, 1979.

BARTON, R. **Foundry trade journal**, 161 (3334): p. 21-119, 1987.

BAUMGART, W.; CUNHA, J. and ANJOS, V. **Het enten van gietijzer**, Gietwerk Perspectief Magazine – v. 5, p. 5-12, 2010.

BAUMGART, W. **Untersuchung des Phasenübergangs von flüssig nach fest am tertiären System Fe-C-Si unter Nichtgleichgewichtsbedingungen**, Lehrstuhl für das gesamte Gießereiwesen und Gießerei-Institut der RWTH Aachen, Aachen - Germany, p. 64-66, 2013.

BEX, T., **Ductile iron: one of the century's metallurgical triumphs**, Modern Casting, p. 82-91, 1991.

BROWN, J., **Fosco Ferrous Foundryman's Handbook**, 1 ed., Oxford, Butterworth-Heinemann, 2000.

BRYANT, D. Foundry **trade** journal, (3143): v. 145, p. 90-381, 1978.

BS EN ISO 945-1: **Microestrutura de ferros fundidos**. Classificação da grafita por análise visual, 2019.

BUNIN, K.P.; MALINOVKA, Y.N.; & FEDEROVA, S.A.; APUD; MORROGH, H. **The solidification of cast iron and interpretation of results obtained from chilled test pieces**. The British Foundryman, v. 53, p. 223, 1960.

CABANNE, P.M. **Magnesium cored wire treatment advantages and disadvantages vis-à-vis other processes**, D.I. Techniques - Suggestions for Ductile Iron Production – SorelMetal, p. 1-2, 2006.

CAI, Q.; WEI, B. **Recent development of ductile cast iron production technology in China**, *China Foundry*, v. 5, n. 2, p. 82-91, 2008.

CASTLEDINE, J. T. TACEY, A. **Processo "In Mold"**. Fund., São Paulo, v.2, n.15, p. 20-28, 1979.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Blucher, p. 672, 2008.

COSTA, E. **Obtenção de ferro fundido nodular através do processo in mold**, *Metalurgia e Materiais*, p. 246-251, 1995.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 1693 Teil 1 (10.73)** – ferro fundido nodular – microestrutura. German, 1973.

DRUMOND, P.P: **Ferro fundido de grafita esferoidal V.3**, p. 77, 2010.

DUARTE, I. R. **Fundição sistema de enchimento**. Sociedade Educacional de Santa Catarina - Instituto Superior Tupy, Joinville, p. 1-59, 2011.

DUCTILE IRON HANDBOOK, American Foundrymens Society. Editors-in-Chief: William Henning and Jerry Mercer. Contributions by members or A.F.S. Cast Iron Molten Metal Processing Committee, p. 23-26, 1992.

DUNKS, C. M. et al. Mold nodulizing and continuous stream treatment techniques as operated in Europe. **AFS Transactions**, v.82, p. 391-406, 1974.

DUNKS, C. M.; RACE, B. **The british foundryman**, 74, v. 5, p. 15-19, 1981.

ERASLAN, D.; BALCI, A.; ÇETIN, B.; UÇAK, N.; ÇIÇEK, A.; YILMAZ, O.D.; DAVUT, K. **Machinability evaluations of austempered ductile iron and cast steel with similar mechanical properties under eco-friendly milling conditions**, Journal of Materials Research and Technology, v. 11, p. 1443-1456, 2021.

FINARDI, J. **Metalurgia ABM (304)**, v. 40, p. 33-37, 1984.

GHOSH, S., **Production aspects of spheroidal graphite iron**, In: Proceedings of the Training Programme on Special Metal Casting and Forming Processes – CAFP, p. 38-51, Jamshedpur, 2008.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo: Editora Bluscher, p. 344, 2009.

GUSSEISEN, BDG mit Kugelgraphit: Herstellung - Eigenschaften - Anwendung, Düsseldorf: **Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie**, p. 2, 2007.

HANSEN, G.M., HARTUNG, C., WHITE, D., **The ductile iron treatment process revisited**, In: Proceedings of the 71st World Foundry Congress: Advanced Sustainable Foundry, p. 287-294, Bilbao, 2014.

HEINE, H. In: **Bcira international conference**, Warwick, v. 87, p. 4, 1987.

HUGHES, I.C.H. A review of solidification of cast irons with flake graphite structures. IN: THE IRON AND STEEL INSTITUTE. **The solidification of metals**. London, v. 110, p. 92-184, 1968.

IACOVIELLO, F.; DI COCCO, V.; FAVARO, G. **Pearlitic Ductile Cast Iron: mechanical properties gradient analysis in graphite elements**, ScienceDirect, Procedia Structural Integrity, v. 9, p. 9-15, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16112 (en)**:- Compacted graphite cast irons. p. 24, 2^o ed., 2017.

JUST, P.; PACYNIK, T. **The influence of the shape of the reaction chamber on spheroidisation of cast iron produced in the lost foam casting process with use of the in mold method**. Stefanowskiego 1/15, p. 90-924, Poland, 2012.

KAMINSKA, J. et al. **Effect of wall thickness on the microstructure of ductile iron castings manufactured by the in mold process using a reaction chamber**. Foundry research Institute, Department of Technology, Azkopińska, v. 73, p. 30-418 Cracow, Poland, 2018.

LABRECQUE, C.; GAGNÉ, M. Ductile iron: fifty years of continuous development. **Canadian metallurgical quarterly**, v. 37, n. 5, p. 343-378, 1998.

LERNER, Y. S. FEF Key Foundry Professor G.V. Panteleev, Research Associate University of Northern Iowa. **Magnesium treatments in ductile iron production**, p. 1-13, 2003.

MANNION, F. **Making ductile iron in the mold**. Foundry, v.84, p. 80-81, Jan. 1973.

MATTER, D. In: **Quality ductile iron production today and tomorrow conference**, Rosemont, AFS, p. 14-16. p. 126-42, 1975.

McCAULAY, J.L. **Production of nodular graphite iron castings by the in mold process**. Foundry Trade Journal, n.15, p. 327-335, 1971.

MELO, G.H.T.; CARMO, D.J. **Correlação entre a microestrutura e propriedades mecânicas do ferro fundido com grafita esferoidal**. Itaúna: 36p. SENAI/CETEF, 1992.

MOORE, H. **Nodulization in the mold ... pros and cons ...** Modern Casting. 63(3):37, 1973.

MORROGH, H. **The solidification of cast iron and interpretation of results obtained from chilled test pieces**. The British Foundryman, p. 221-42, 1960.

MULLINS, J.D. Nodule count – why and how! **Ductile Iron News**, n. 2, p. 1-2, 2003.

NASCIMENTO; SANTANA. **Ferros fundidos cinzento e branco**. Joinville: UNISOCIESC / Nova Letra, p. 360, 2016.

PIETROWSKI, S. **Influence of reaction chamber shape on cast-iron spheroidization process in-mold**. Department of Materials Technologies and Production Systems, Technical University of Łódź, Stefanowskiego 1/15 Street, v. 10, p. 90-924 Łódź, Poland, 2009.

PILASTRO, F.; REMONDINO, M. & NATALE, E. **Tratamiento en mol del hierro nodular: aspectos técnicos y economicos del processo**. Rio de Janeiro. ILAFA, 1976. s.p. (Trabalho apresentado no I Congresso Latino Americano de Fundição promovido por ILAFA, ABM, ABIFFA, IBS realizado no Rio de Janeiro em novembro de 1976).

PRETI, ORLANDO. **Caracterização de Ferro Fundido Branco Bruto de fundição – ASTM A 532**. SOCIESC. 2003.

RADZIKOWSKA, J. **Metallography and Microstructures of Cast Iron**, in Metallography and Microstructures ASM Handbook, Ohio - USA, ASM International, v. 9, p. 565-587, 2004.

RIPOSAN, I.; CHISAMERA, M.; STAN, S.; SKALAND, T. **Surface graphite degeneration in ductile iron castings for resin molds**, Tsinghua Science & Technology, v. 13, n. 2, p. 157-163, 2008.

SANTOS, A. BRANCO. S. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas IPT, v. 3 e 4, p. 199, 1991.

SILVA, Ana Paula; CARMO; Denilson José do; DIAS; José Felipe; et al. **Análise comparativa de ligas para nodulização através do processo “in mold”**. Itaúna, SENAI/CETEF, 1998.

SILVA, C. **Influência do número de nódulos de grafita nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular austemperado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 116, 2005.

SKALAND, T. **Ductile iron shrinkage control through graphite nucleation and growth Kristiansand** : Elkem Technical Information Sheets, v.13, p.157-163, 2003.

STAWARZ, M.; JANERKA, K. AND DOJKA, M. **Selected phenomena of the in-mold nodularization process of cast iron that influence the quality of cast machine parts**. Department of Foundry Engineering, Silesian University of Technology, Towarowa 7 str., p. 44-100 Gliwice, Poland; 2017.

WANG, B.; QIUB, F.; BARBER, G.C.; PAN, W.; CUI, W.; WANG, R. **Microstructure, wear behavior and surface hardening of austempered ductile iron**, Journal of Materials Research and Technology, v. 9, Issue 5, p. 9838-9855, 2020.

WANG, C. **Spheroidal graphite crankshaft foundry and development**, *Automobile Technology & Material*, n. 3, p. 1-3, 2006.

APÊNDICE A - Dimensionamento do sistema de canais

1) Informações gerais:

- ✓ Peso do bloco para o corpo de prova escalonado: 7,70 kg;
- ✓ Peso do bloco para o corpo de prova de tração: 5,50 kg;
- ✓ Escalonamento para o sistema de canais: 1:2:0,85;
- ✓ Número de ramificações: 2;
- ✓ Proporção de liga nodularizante utilizada: 0,8% e 1,0% sobre o peso do metal a ser tratado;
- ✓ Vazão média prevista: 6,5 kg/s;
- ✓ Área de entrada na câmara de reação: +15% em relação à área dos canais de ataque;
- ✓ Área de saída na câmara de reação: +10% em relação à área dos canais de ataque;
- ✓ Peso do cacho a ser tratado: 66,91 kg;
- ✓ Peso do cacho total: 75,60 kg.

2) Cálculo do sistema de enchimento:

- ✓ Cálculo da área do canal de descida:

$$Sd = 2,26 \times \frac{Vc \times B \times 1,057}{t \times \sqrt{26}}$$

Onde:

Sd: área do canal de descida em mm²;

Vc: volume total de metal líquido a ser preenchido a cavidade do molde em cm³ x 1,057 (razão da densidade sólida e densidade líquida do ferro fundido);

B: coeficiente de atrito. Para canais cuja a distância entre o canal de descida e o final do canal de distribuição seja inferior a 400mm, seu valor é 1,8;

t: tempo de enchimento em segundos. Obtido através da vazão determinada de 6,5 kg/s e o peso total do cacho de 75,60 kg. Logo, o tempo de enchimento obtido foi de 11 segundos;

H: altura metalostática em cm. Neste caso, corresponde somente a altura da caixa superior pois a peça é toda na caixa inferior: $(26\text{cm})^{1/2}$.

$$S_d = \frac{2,26 \times 10356,1 \times 1,057 \times 1,8}{11 \times \sqrt{26}}$$

$$S_d = 794\text{mm}^2.$$

✓ Cálculo do diâmetro do canal de descida:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Onde:

D: diâmetro do canal de descida em mm;

A: área do canal de descida em mm^2 .

$$D = \sqrt{4 \times 794 / \pi}$$

$$D = 32\text{mm}.$$

✓ Cálculo da área do canal de distribuição:

$$S_c = \frac{S_d \cdot E_c}{R_a}$$

Onde:

Sc: área do canal de distribuição em mm^2 ;

Ec: fator de escalonamento correspondente ao canal de distribuição que é 2;

Ra: número de ramificação do canal de distribuição, que também é 2.

$$S_c = \frac{794 \times 2}{2}$$

$$S_c = 794\text{mm}^2$$

✓ Cálculo das dimensões do canal de distribuição:

$$c \times c = \sqrt{S_c}$$

Onde:

c x c: altura e a largura do canal de distribuição.

$c \times c = (794)^{1/2} = 28 \times 28 \text{ mm}$ (devido ao ângulo de saída do canal, será utilizado 30x30mm)

✓ Cálculo da área do canal de ataque:

$$Sa = \frac{Sd \cdot Ea}{Na}$$

Onde:

Sa: área do canal de ataque em mm²;

Ea: fator de escalonamento correspondente ao canal de ataque, nesse caso 0,85;

Na: é o número de ataques, nesse caso 2.

$$Sa = \frac{794 \times 0,85}{2}$$

Sa = 337,45 mm².

✓ Cálculo das dimensões do canal de ataque:

$$a = \frac{Sa}{b}$$

Onde:

a: altura do canal de ataque;

b: largura do canal de ataque;

$$a = \frac{337,45}{42}$$

a = 8mm.

✓ Cálculo das dimensões da câmara de reação na forma retangular:

$$A = \frac{\frac{F}{t}}{\frac{2}{K}}$$

Onde:

A: área da seção longitudinal da câmara de reação em cm²;

F: peso da quantidade de metal a ser tratado em kg;

t: tempo de enchimento em segundos;

2: quantidade de câmaras de reação no molde;

K: coeficiente de dissolução da liga. Calculado pelo gráfico 9 (Coeficiente de dissolução da liga & Percentual de magnésio residual).

$$A = \frac{\frac{66,91}{11}}{2}$$

$$0,065$$

$$A = 46,8 \text{ cm}^2.$$

$$Q1 = \frac{\frac{F \times La}{100}}{2} \quad Q2 = \frac{\frac{F \times Lb}{100}}{2}$$

Onde:

Q1: proporção de liga considerando o percentual de 0,8%;

F: peso do metal a ser tratado;

La: percentual de liga considerando 0,8%;

2: quantidade de câmaras de reação no molde;

Q2: proporção de liga considerando o percentual de 1,0%;

F: peso do metal a ser tratado;

Lb: percentual de liga considerando 1,0%.

$$Q1 = \frac{\frac{66,91 \times 0,8}{100}}{2}$$

$$Q1 = 0,267 \text{ kg} \sim 265 \text{ gramas.}$$

$$Q2 = \frac{\frac{66,91 \times 1,0}{100}}{2}$$

$$Q2 = 0,3345 \text{ kg} \sim 335 \text{ gramas.}$$

✓ Cálculo da câmara de reação considerando 1,0% de liga nodularizante:

$$\frac{A \times Hl}{1000} \times dl = Q2$$

$$A \times Hl \times dl = Q2 \times 1000$$

$$Hl = \frac{Q2 \times 1000}{A \times dl}$$

Onde:

A: área da seção longitudinal da câmara de reação em cm²;

Hl : altura ocupada pela liga nodularizante na câmara de reação;

dl : densidade da liga nodularizante;

Q2: proporção de liga considerando o percentual de 1,0%.

$$Hl = \frac{0,335 \times 1000}{46,8 \times 2,2}$$

$$Hl = \frac{335}{102,96}$$

$$Hl : 3,25\text{cm} \sim 33\text{mm}.$$

✓ Cálculo da largura da seção longitudinal da área média da câmara de reação:

$$L = 60 - \left\{ \left[\tan 3^\circ \times \left(\frac{33}{2} + 15 \right) \right] \times 2 \right\}$$

$$L = 56,7\text{mm} \sim 5,67\text{cm}$$

Onde:

L: largura da seção da área média da câmara de reação;

60: largura da câmara de reação no plano de divisão;

Tang 3º: ângulo de saída da câmara de reação;

33: altura ocupada pela liga nodularizante na câmara de reação;

2: para considerar a altura média ocupada pela liga nodularizante;

15: Região de extra-câmara (vazio correspondente entre a liga nodularizante e o molde superior).

$$C = \frac{46,8\text{cm}^2}{5,67\text{cm}}$$

$$C = 8,25\text{cm} \sim 82,5\text{mm}$$

$$Cv = 82,5 + \{[\tan 3^\circ \times (\frac{33}{2} + 15)] \times 2\}$$

$$Cv = 8,58\text{cm} \sim 86\text{mm}$$

Onde:

C: comprimento da seção da área média da câmara de reação;

Cv: comprimento da câmara de reação no plano de divisão;

✓ Cálculo da região de extra-câmara considerando o percentual de liga de 0,8%:

$$Hl = \frac{Q1 \times 1000}{A \times dl}$$

$$Hl = \frac{0,265 \times 1000}{46,8 \times 2,2}$$

$$Hl = \frac{265}{102,96}$$

$$Hl = 2,57\text{cm} \sim 26\text{mm}$$

✓ Obs.: a região de extra-câmara considerando o percentual de liga de 0,8% será de 22mm:

$$33 - 26 = 7$$

$$7 + 15 = 22\text{mm}$$

✓ Cálculo das dimensões da câmara de reação na forma esférica:

$$A = \frac{\frac{F}{t}}{\frac{2}{K}}$$

$$A = \frac{\frac{66,91}{11}}{\frac{2}{0,065}}$$

$$A = 46,8 \text{ cm}^2$$

✓ Cálculo da câmara de reação considerando 1,0% de liga nodularizante:

$$Q2 = \frac{\frac{66,91 \times 1,0}{100}}{2}$$

$$Q2 = 0,3345 \text{ kg} \sim 335 \text{ gramas.}$$

$$P = \frac{V}{1000} \times 2,2$$

Onde:

P: peso da liga nodularizante considerando 1%;

V: volume da região ocupada pela liga nodularizante na câmara de reação;

2,2: densidade da liga nodularizante.

$$P \times 1000 = V \times 2,2$$

$$V = \frac{P \times 1000}{2,2}$$

$$V = \frac{0,335 \times 1000}{2,2}$$

$$V = 152,2 \text{ cm}^3.$$

$$L = 60 - \left\{ \left[\tan 3^\circ \times \left(\frac{33}{2} + 15 \right) \right] \times 2 \right\}$$

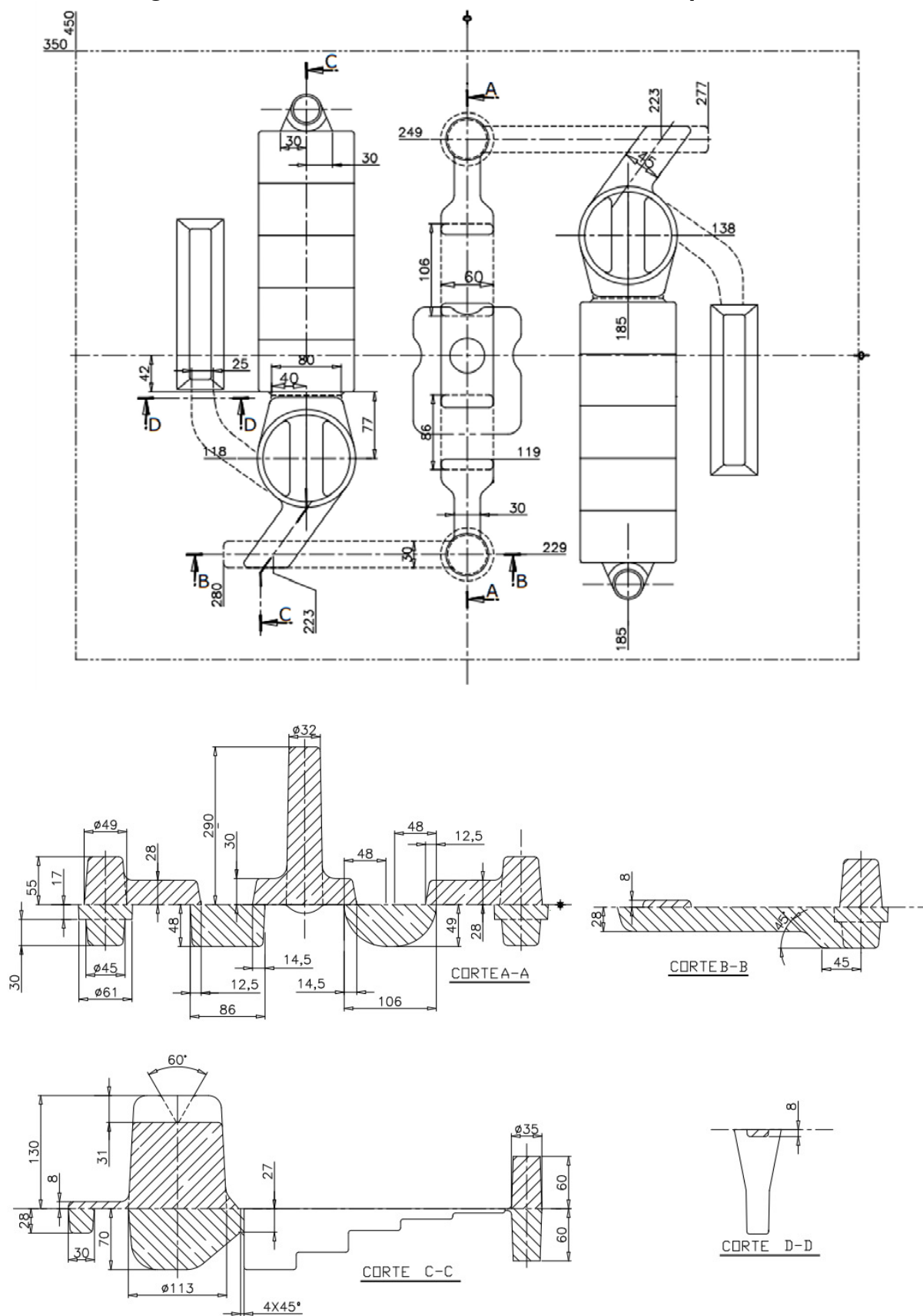
$$L = 56,7 \text{ mm} \sim 5,67 \text{ cm.}$$

$$C = \frac{46,8 \text{ cm}^2}{5,67 \text{ cm}}$$

$$C = 8,25 \text{ cm} \sim 82,5 \text{ mm}$$

Considerando o raio de 48mm da câmara de reação esférica, para um comprimento da área de reação de 82,5mm, obtêm-se um comprimento na linha de divisão de 106mm e altura total da câmara de reação de 49mm.

Figura A1 - Desenho do sistema de enchimento preliminar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – Modificação da coluna de vazamento após ajuste das variáveis de processo (fusão principal)

1) Informações gerais:

- ✓ Peso do bloco para o corpo de prova escalonado: 7,70 kg;
- ✓ Peso do bloco para o corpo de prova de tração: 5,50 kg;
- ✓ Escalonamento para o sistema de canais: 1:2:0,85;
- ✓ Número de ramificações: 2;
- ✓ Proporção de liga nodularizante utilizada: 0,8% e 1,0% sobre o peso do metal a ser tratado;
- ✓ Vazão média prevista: 6,5 kg/s;
- ✓ Área de entrada na câmara de reação: +15% em relação à área dos canais de ataque;
- ✓ Área de saída na câmara de reação: +10% em relação à área dos canais de ataque;
- ✓ Peso do cacho a ser tratado: 66,91 kg;
- ✓ Peso do cacho total: 71,60 kg.

2) Cálculo do coeficiente “B”:

- ✓ Usando a equação do “Sd” para o cálculo real do coeficiente “B”:

$$Sd = 2,26 \times \frac{Vc \times B \times 1,057}{t \times \sqrt{26}}$$

$$804,2 = \frac{2,26 \times 9808,2 \times 1,057 \times B}{14 \times \sqrt{26}}$$

$$57408,8 = 23430,0 \times B$$

$$B = 2,45$$

3) Cálculo do sistema de enchimento considerando “B” real:

- ✓ Cálculo da área do canal de descida:

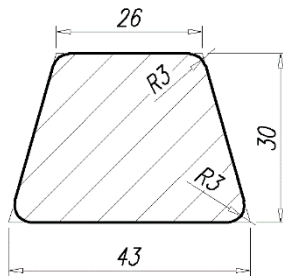
$$Sd = 2,26 \times \frac{V_c \times B \times 1,057}{t \times \sqrt{26}}$$

$$Sd = \frac{2,26 \times 9808,2 \times 1,057 \times 2,45}{11 \times \sqrt{26}}$$

$$Sd = \frac{57403,6}{56,1}$$

$$Sd = 1023,2 \text{ mm}^2$$

✓ Cálculo da seção trapezoidal do canal de descida:



$$\text{Área do trapézio} = \frac{(26 + 43) \times 30}{2}$$

