

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

FLÁVIO JOSÉ PANETO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA LUVA COM O CORPO ISOLANTE E O
TAMPO EXOTÉRMICO PARA REDUÇÃO DOS REFUGOS DE
FUNDIÇÃO POR RECHUPE NO VIRABREQUIM 2,4 LITROS.**

VOLTA REDONDA
2017

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA LUVA COM O CORPO ISOLANTE E O
TAMPO EXOTÉRMICO PARA REDUÇÃO DOS REFUGOS DE
FUNDIÇÃO POR RECHUPE NO VIRABREQUIM 2,4 LITROS.**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, sob a orientação do prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago, na área de concentração de processamento e caracterização de materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos, linha de pesquisa de materiais compósitos.

Aluno:

Flávio José Paneto

Orientador:

Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago

Coorientador:

Prof. Dr. Gilberto Carvalho Coelho

VOLTA REDONDA

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

P191d Paneto, Flávio José.

Desenvolvimento de uma luva com o corpo isolante e o tampo exotérmico para redução dos refugos de fundição por rechupe no virabrequim 2,4 litros. / Flávio José Paneto. - Volta Redonda: UniFOA, 2017.

96 p. : II

Orientador(a): Profº Dr. Roberto de Oliveira Magnago

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em
Materiais, 2017

1. Materiais - dissertação. 2. Luva isolante. 3. Tampo exotérmico. 4. Rechupe – fundição. I. Magnago, Roberto de Oliveira. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Flávio José Paneto

DESENVOLVIMENTO DE UMA LUVA COM O CORPO ISOLANTE E O
TAMPO EXOTÉRMICO PARA REDUÇÃO DOS REFUGOS DE FUNDIÇÃO
POR RECHUPE NO VIRABREQUIM 2,4 LITROS

Orientador:

Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago

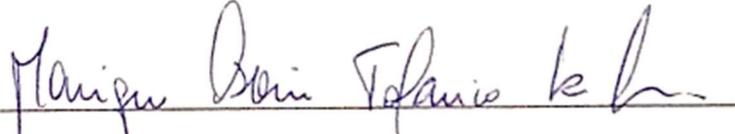
Coorientador

Prof. Dr. Gilberto Carvalho Coelho

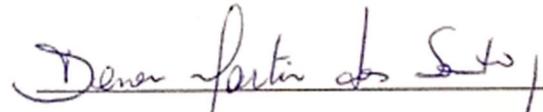
Banca Examinadora



Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago



Profa. Dra. Monique Osório Talarico da Conceição



Prof. Dr. Dener Martins Santos

Dedico este trabalho ao meu finado pai, Ênio José Paneto e ao pequeno Nickolas Tavares Paneto, meu filho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me dado sabedoria e saúde para lutar pelos meus objetivos. Agradeço aos meus pais Ênio e Arminda por me manterem em um caminho digno, à minha família pelo apoio durante a realização deste trabalho, mesmo significando a subtração de várias horas de convívio no lar. Agradeço, também, ao meu orientador Prof. Dr. Roberto O. Magnago pelo apoio e disponibilidade, e ao Co-orientador Prof. Dr. Gilberto Coelho que, com suas habilidades, orientaram, estimularam e direcionaram o desenvolvimento deste projeto, impulsionando o crescimento pessoal.

À colega MS. Taíse Azevedo e ao colega Eng. Atan Cardoso, pela ajuda e participação na realização deste trabalho. Aos parceiros de Foseco S.A. e MAGMA⁵, pela disponibilidade e direcionamento dos assuntos técnicos e pelo apoio na utilização dos recursos dos laboratórios da empresa.

Aos colegas e mestres do curso de mestrado profissional em materiais do UniFOA.

EPÍGRAFE

“O período de maior ganho de conhecimento e experiência é o período de maior dificuldade na vida de cada um.”

Dalai Lama.

RESUMO

Atualmente há no mercado várias tecnologias que auxiliam a indústria de fundição no controle de fluxo de metal, no controle da solidificação dos metais, dimensionamento de sistemas de enchimento e alimentação, desenvolvimento de produtos ou insumos, e em outros campos de atuação. A utilização destas tecnologias ou de produtos originados das mesmas, tem impacto direto na redução de perdas de processos induzindo-os à melhoria de produtividade. No sentido de unir os esforços para desenvolvimento destas duas vertentes a simulação computacional ocupa um importante espaço neste cenário. O alto grau de confiabilidade alcançado, alavanca a cada dia, pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de software para simulações computacionais e estimula as fundições a colherem frutos desta poderosa ferramenta.

Aliando tecnologia à melhoria de processo, utilizando técnicas de simulação numérica para a obtenção de subsídios para avaliação da viabilidade de construção de protótipos de luvas que induzam os efeitos esperados no fundido, este trabalho propiciou a construção de uma luva que combina o material isolante, utilizado no corpo da mesma e o material exotérmico, utilizado no tampo, para reduzir a probabilidade de formação de rechupe no virabrequim 2,4 litros, fundido utilizando o processo Shell Molding, na empresa BR Metals Fundições.

Trabalhos para de redução de refugo agregam valor aos fundidos assim como os estudos direcionados aos insumos de fundição, potencialmente tornando-os diferenciais de fornecimento em mercados competitivos, colocando o processo em níveis de excelência de mercado.

A consolidação dos resultados encontrados nas simulações realizadas, como uma maior homogeneidade microestrutural, redução de pontos quentes isolados e da tendência à porosidades, e na prática, onde a luva apresentou resultados iniciais promissores com a redução da tendência à formação do rechupe, considerando as bases teóricas estudadas, as necessidades impostas aos virabrequins fundidos, os princípios de formação dos rechupes nos fundidos e as técnicas utilizadas para eliminação dos mesmos, direciona para uma melhora no funcionamento de luvas que combinam os princípios exotérmicos e isolantes e ainda, abre caminho para estudos relacionados à insumos de fundição cujos funcionamentos estão atrelados aos resultados convencionais.

Palavras-chave: virabrequins, rechupe, simulação, luvas isolantes e exotérmicas.

ABSTRACT

Currently there are several technologies on the market that help the foundry industry, whether in the control of metal solidification, system design, metal flow control, product or input development, or other fields of activity. The use of these technologies or products originating from them, has a direct impact on reducing process losses and inducing them to improve productivity. In order to unite the efforts to develop these two aspects, the computational simulation occupies an important space in this scenario. The high degree of reliability achieved, leverages every day, researches related to the development of software for computational simulations and encourages foundries to reap the benefits of this powerful tool.

Combining technology and process improvement, using numerical simulation techniques to obtain subsidies to evaluate the feasibility of constructing sleeve prototypes that induce the expected effects in the melt, this work provided the construction of a sleeve that combines the insulating material used in the body thereof, and the exothermic material used in the top, to reduce the likelihood of formation of shrinkage in casted crankshaft 2.4 liters produced by BR Metals Fundições, using the Shell Molding process.

Works for reducing scrap and studies directed to casting inputs add value to castings, which can provide advantages in competitive markets and lead the production process to the market levels of excellence.

The consolidation of the results found in the simulations carried out, such as greater microstructural homogeneity, reduction of isolated hot spots and tendency to porosity, and in practice, where the sleeve presented promising initial results with the reduction of the tendency to the formation of the shrinkage, considering the bases theoretical principles, the requirements imposed on the casted crankshafts, the formation principles of the shrinkages and the techniques used to eliminate them, leads to an improvement in the operation of sleeves that combine the insulating and exothermic principles and, it opens the way to studies related to foundry inputs whose performances are linked to conventional results.

Key words: crankshafts, shrinkage, simulation, insulation and exothermic sleeves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama de equilíbrio Fe-C.....	21
Figura 2.	Mecanismo de crescimento da grafita	25
Figura 3.	Esquema da técnica de nodulização “sanduíche”	26
Figura 4.	Técnicas de nodulização: (A) - simples transferência; (B) - tundish cover; (C) – conversor GF (Georg Fischer); (D) – imersão por sino;(E) – panela rotativa; (F) in mold.....	27
Figura 5.	Fluxograma de obtenção de um fundido em nodular.....	31
Figura 6.	Sequência de contração sofrida pela maioria das ligas.....	34
Figura 7.	Isoterma de solidificação no instante t1	35
Figura 8.	Isoterma de solidificação no instante t2.....	35
Figura 9.	Isoterma de solidificação no instante t3.....	35
Figura 10.	Isoterma de solidificação no instante t4.....	36
Figura 11.	Tipos de rechupe	36
Figura 12.	Variação do volume durante a solidificação do ferro fundido	37
Figura 13.	Rechupe primário (A - grande vazio), rechupe secundário (B - poros menores) em virabrequim.....	38
Figura 14.	Esquema de uma liga de pequeno intervalo de solidificação e o rechupe característico	40
Figura 15.	Esquema de uma liga de grande intervalo de solidificação e o rechupe característico	40
Figura 16.	Virabrequim fundido (esq) e virabrequim forjado (dir).....	46
Fonte:	Arquivo BR Metals	46
Figura 17.	Ferramental utilizado no processo Shell, montado na máquina	51
Figura 18.	Giro da máquina para deposição de areia.....	52
Figura 19.	Casca shell já com a espessura definida.....	52
Figura 20.	Cura externa da casca com o forno.....	53
Figura 21.	Desempeno das cascas	53
Figura 22.	Acabamentos das cascas e colocação de filtros e luvas.....	54
Figura 23.	Cascas fechadas com grampos e posicionadas nas caixa de moldagem.....	54
Figura 24.	Enchimento da caixa de moldagem com granalhas de aço, compactação do conjunto moldado (vibração) e vazamento (enchimento do molde)	55
Figura 25.	Estação de desmoldagem	55
Figura 26.	Estação de quebra de canais, massalotes e de jateamento (jato de granalhas).....	56
Figura 27.	Linha de acabamento das peças	56
Figura 28.	Linha de inspeções finais	57
Figura 29.	Tanque de oleagem e estação de embalagem das peças	57
Figura 30.	Principais causas de refugo, no processo shell 2 no período de janeiro a junho 2015.....	61
Figura 31.	Região de estudo de redução de porosidades por rechupe	62

Figura 32.	Desenho básico para construção da luva.....	64
Figura 33.	Perfil de construção das luvas isolantes e exotérmicas.....	65
Figura 34.	Equipamento utilizado para homogeneização da mistura	66
Figura 35.	Mistura preparada para moldagem.....	66
Figura 36.	Corpo da luva após moldagem com material isolante	67
Figura 37.	Moldagem do tampo exotérmico.....	67
Figura 38.	Operações de retirada de umidade e cura da luva	68
Figura 39.	Luva exotérmica e isolante	68
Figura 40.	Requisitos básicos para confecção e ensaios das amostras	69
Figura 41.	Montagem da nova luva no molde.....	70
Figura 42.	Peças produzidas utilizando as novas luvas	70
Figura 43.	Definição dos parâmetros de simulação: (a)- definição inicial (b)- ajuste após fundição das amostras.....	71
Figura 44.	Simulação do enchimento das cavidades.....	72
Figura 45.	Perfil de temperatura das peças, obtido na simulação	73
Figura 46.	Pontos quentes resultantes na microestrutura (A) processo atual (P) processo proposto	76
Figura 47.	Resultados da simulação quanto à porosidade, (A) sistema atual e (P) sistema proposto	77
Figura 48.	Percentual de perlita em diferentes pontos da peça.....	78
Figura 49.	Percentual de ferrita obtidos na simulação	80
Figura 50.	Luva montada	81
Figura 51.	Inspeção dimensional da luva.....	81
Figura 52.	Dimensões nominais e tolerâncias das luvas	82
Figura 53.	Teste de peso suportado pela luva.....	83
Figura 54.	Sequência de funcionamento da luva isolante e exotérmica: (A) - início de enchimento da luva, (B) – final de enchimento da luva, (C) – luva cheia de metal líquido, (D) – início de funcionamento do tampo exotérmico, liberação de calor, (E) – final da exotermia, (F) – solidificação da luva	84
Figura 55.	Report dos resultados do ensaio de inspeção visual.....	85
Figura 56.	Report dos resultados dos ensaios de ultrassom (US).....	86
Figura 57.	Report dos resultados dos ensaios de líquido penetrante (LP)	87
Figura 58.	Report dos resultados da composição química (CQ)	87
Figura 59.	Report dos resultados de propriedades mecânicas (PM).....	88
Figura 60.	Report dos resultados da análise metalográfica (MET).....	88
Figura 61.	Posição dos corpos de prova para realização das análises	89
Figura 62.	Imagem da metalografia realizada nas amostras.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparativo dos valores especificados com os valores encontrados na amostra.....	73
Tabela 2. Propriedades mecânicas obtidas na amostra.....	74
Tabela 3. Microestrutura especificada pelo cliente.....	78

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

TF 8478 – Identificação da peça estudada

CEP – Controle Estatístico de Processo

APQP – (Advanced Product Quality Planing) - Planejamento Avançado da Qualidade do Produto

FMEA – (Failed Mode and Effect Analisys) - Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos

SIX SIGMA – Programa de melhoria contínua

5S – Programa de organização e limpeza

LEAN MANUFACTURING – Produção enxuta

AMERICAN FOUNDRYMENT SOCIETY – Sociedade Americana de Fundição

INTERNATINAL NICKEL COMPANY – Companhia Internacional de Níquel

TUNDISH COVER – Processo/panela para tratamento de nodularização do metal

GF(GEORGE FISCHER) – Processo para tratamento de nodularização do metal

IN MOLD – no próprio molde

PONT–A–MOUSSON – Processo para tratamento de nodularização do metal

VORTEX – Processo para tratamento de nodularização do metal

T–NOCK – Processo para tratamento de nodularização do metal

FLOTRET – Processo para tratamento de nodularização do metal

TIP (TREATMENT, INCOCLATION, POURING) – tratamento, inoculação e vazamento – Processo para tratamento de nodularização do metal

Fe–Si – Liga ferro - silício

Sr – Estrôncio

Ba – Bário

Ce – Cério

FADING – tempo de efetividade do magnésio (poder de esferoidização da grafita)

SALITRE – Nitrato

FLUORITA – Mineral (composto basicamente por fluoreto de cálcio)

CIANITA – Mineral (basicamente um silicato)

MULITA – Mineral (composto basicamente por alumina e sílica)

SILICATO – Mineral (composto basicamente de silício e oxigênio)

CRONING – Antecessor do processo de fundição que utiliza areia coberta com resina

TERMOSETTING – processo de endurecimento térmico

AREIA SHELL – areia coberta com resina utilizada para fundição

SHELL MOLDING – Processo que utiliza a areia shell para fundição de peças

REPORT – Relatório de resultados

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVO	18
3. JUSTIFICATIVA	18
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
4.1 – A Indústria de Fundição	19
4.2 - Ferros fundidos.....	21
4.3 - Diagrama de fases.....	22
4.4 - Ferro Fundido Nodular.....	23
4.4.1 - Obtenção do ferro fundido nodular.....	23
4.4.1.1 - Nodularização	25
4.4.1.2 - Inoculação.....	29
4.5 – Defeitos Característicos do Ferro Fundido Nodular	32
4.6 - Formação de Rechupe e Frentes de Solidificação	34
4.7 - Massalotes e Luvas	41
4.8 - Virabrequim e sua Produção em Ferro Fundido.....	45
4.9 - Simulação Aplicada à Fundição	47
4.9.1 - O software MAGMA ⁵	48
4.10 - O Processo Shell Molding	50
4.10.1 Vantagens do Processo “Shell Molding”	58
4.10.2 Desvantagens do Processo “Shell Molding”.....	59
5. MATERIAIS E MÉTODOS	60
5.1 – Aferição dos dados do processo.....	60
5.2 - Ajustes dos parâmetros de simulação (set up do software)	61
5.3 – Simulação do sistema de alimentação.....	63
5.4 – Avaliação das propriedades mecânicas e microestruturais	63
5.5 – Confecção das luvas isolantes/exotérmicas	64
5.6 – Fundição das amostras com as luvas isolantes/exotérmicas	69
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
6.1 – Análise dos resultados da simulação das luvas.....	72
6.2 – Análise das luvas produzidas	81
6.3 – Análise e caracterização das amostras fundidas.....	85

7. CONCLUSÕES	90
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

1. INTRODUÇÃO

É inegável que, nos últimos anos, há no ambiente industrial uma busca incessante por melhorias dos processos e procedimentos produtivos assim como maiores desempenhos dos materiais e dos respectivos produtos.

As indústrias direcionadas à produção de ferros fundidos têm disseminado vários estudos e pesquisas que visam o aprimoramento da tecnologia de manufatura, tendendo assim, à melhoria das propriedades dos materiais, nos processos maior estabilidade, rendimento e menores custos de produção sem abrir mão das características extremamente críticas para a qualidade dos produtos [1].

Há uma grande necessidade, atualmente relacionada ao mercado de fundidos, de estudos direcionados à investigação e descobertas de novas tecnologias para aperfeiçoamento do processo de produção que busque atingir a elevada qualidade aliada ao baixo custo.

As necessidades impostas pelos novos sistemas aceleram a busca por performances cada vez melhores. Neste contexto, os ferros fundidos com grafita esferoidais ou nodulares, que têm diversificadas aplicações nas indústrias mecânica, siderúrgica, naval, ferroviária, agrícola, química, petroquímica, construção civil, têxtil, obtenção, transmissão e distribuição de energia e largamente na automobilística, logo, significativa importância no mercado de fundidos, requerem expressivos esforços direcionados à manufatura e posterior processamento [1,2].

A busca de um processo otimizado e ao mesmo tempo robusto, estável e que gere poucas perdas impulsiona as fundições a utilizarem estudos direcionados e emprego de novas tecnologias.

Um exemplo de tecnologia aliada à indústria de fundição é a utilização de simulações de processos. Há no mercado softwares que podem simular satisfatoriamente o processo metalúrgico na tentativa de redefinir os parâmetros de processo. Esta tecnologia tem se mostrado uma ferramenta de grande confiabilidade e auxiliado as indústrias nos métodos empregados para melhoria de seus processos, aliado à melhoria da produtividade uma vez que obtêm sucesso nos estudos de redução de defeitos e de perdas no processo. Sendo de extrema importância também, no auxílio ao desenvolvimento e melhorias de matérias primas e insumos, permitindo maximizar a utilização dos mesmos em benefício do processo. Esta tecnologia revela-se eficiente até mesmo aplicada à processos robustos, antigos e que tenham

comportamento aparentemente estável, e onde não se tenha muita liberdade para se trabalhar as variáveis que constituem o mesmo [3].

2. OBJETIVO

Este projeto tem por objetivo, o desenvolvimento de um insumo de fundição cujo funcionamento consiga reduzir refugos de fundição por rechupe, no virabrequim “TF 8478” produzido em ferro fundido nodular, utilizando o processo Shell Molding na Empresa BR Metals Fundições.

3. JUSTIFICATIVA

A propagação do conhecimento sobre os insumos de fundição, a potencialização dos efeitos e resultados por eles proporcionados justifica os estudos e desenvolvimentos relacionados. Além do relevante potencial comercial, com a redução de custos produtivos através da redução de refugos, há também a contribuição dos estudos referentes a matérias primas, processos de fabricação dos insumos, que fornecem tecnologias que agregam valor aos fundidos, à indústria de manufatura e transformação de fundidos e, por consequência, aos usuários finais. A possibilidade de redução dos custos envolvidos nos processos, desde a transformação da matéria prima até a peça final usinada e ou montada, através da redução dos defeitos, é um grande diferencial no mercado altamente competitivo que atualmente exige dos processos produtivos constantes melhorias, estabilidade e aperfeiçoamento.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 – A Indústria de Fundição

A prática nos tem mostrado e vários trabalhos apresentam que embora seja um processo de manufatura de peças metálicas, considerado historicamente simples, a indústria de fundição, extinguiu há algum tempo, o antigo conceito de preencher com metal líquido, cavidades de um molde com forma e dimensões pré-definidas. Com a evolução dos processos, atualmente os fundidos apresentam formas e acabamentos bem próximos aos finais e os limites e janelas de processo, a cada dia se tornam menores [4].

Os estudos da cadeia produtiva da indústria de fundição envolvem desde a obtenção das matérias primas, passa por todas as fases de processamento e abrangem os requisitos dos fundidos.

A manufatura de componentes metálicos, partindo do metal líquido, principalmente em ferro fundido e aço, mas não restrito a estes materiais, atingiu novos patamares logo que o conhecimento e o controle microestrutural se difundiu, aliado à evolução dos equipamentos e processos. Um exemplo desta evolução é que, atualmente é possível obter machos e moldes sem a necessidade de confecção de um modelo ou de caixas de macho[5].

Embora este meio de fabricação permita, ainda, trabalhar de forma artesanal, possibilitando a produção, se necessário, de peças únicas, a indústria de fundição abastece as mais variadas linhas de montagem. Ainda que os fundidos passem por processos de usinagem, podem chegar às linhas de montagem arrastando problemas oriundos da fundição. Esta hipótese traz consigo a necessidade de estudos relacionados à qualidade dos fundidos e, talvez até mesmo em níveis mais estruturados que a própria fundição [4].

Desde os primórdios da fundição, onde a qualidade era controlada concomitantemente com as etapas produzidas, até os dias atuais com controles estatísticos de processos (CEP), houve grandes mudanças na mentalidade corporativa e a também a adoção de modernos conceitos de qualidade, aplicando-os às grandes produções.

No atual cenário a indústria de fundição, que tem grande parte de seu desempenho em qualidade associado à qualidade do fundido, vem adotando

procedimentos para manter o processo mais estável possível, reduzindo as variações, atender aos requisitos dos clientes e para prevenir o aparecimento de defeitos, utilizando ferramentas como APQP e FMEA, SIX SIGMA, entre outros [6].

Este panorama é bastante comum e quase que uma exigência do mercado consumidor, porém ainda há no Brasil outra realidade, composta em grande parte por fundições de pequeno porte que se utilizam de poucos recursos tecnológicos e trabalham com produtos de baixo valor agregado. Considerando este cenário, há nestas fundições um potencial de elevação do nível de seus processos e melhoria na qualidade de seus produtos sem grandes investimentos e trilhar o caminho que os grandes produtores de fundidos desenvolveram com o objetivo de conquistar uma posição de liderança junto aos clientes [4,6].

Dentre as medidas adotadas, algumas refletem as necessidades impostas pela globalização como:

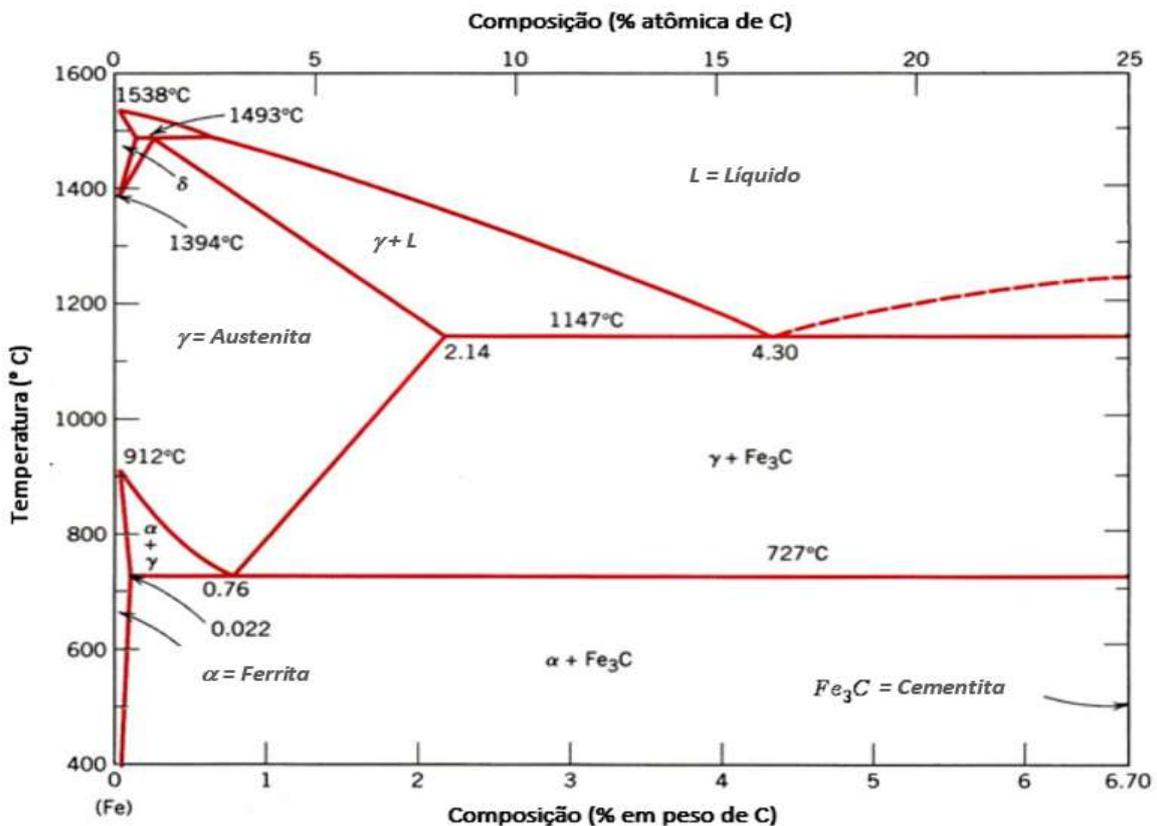
- foco no cliente, atendendo às diversas necessidades, não limitando-se à produtos isentos de falhas, mas também a custos competitivos, entregas dentro dos prazos estabelecidos, parceria na solução de problemas, visitas periódicas de pós-venda;
- melhora da qualidade em relação ao produto e ao processo, através de técnicas e treinamentos como APQP, 5S, Lean Manufacturing, entre outros que impõem à toda estrutura da fundição a preocupação com a melhoria das práticas e desempenho operacionais e conseqüentemente, com os resultados obtidos;
- adoção de projetos que buscam permanentemente a redução dos custos;
- treinamento ao quadro profissional, desenvolvendo habilidades específicas ou habilitando-os ao trabalho em grupos multidisciplinares;
- busca constante da redução de perdas e a otimização dos processos, desde o recebimento da matéria prima até as operações finais de envio ao cliente;
- atenção ao mercado de matérias primas e insumos e suas novas tecnologias de obtenção e fabricação, bem como a possibilidade de adaptação com inferência de ganhos aos processos;
- atenção especial aos refugos de fundição, paradas ou interrupções de processo e reclamações de clientes, conduzindo-os às análises sistêmicas específicas e corrigindo-os no menor tempo possível [2].

Os critérios acima destacados visam, entre outras características, o aprimoramento da tecnologia de fabricação a fim de induzir ao material melhores propriedades, ao processo mais estabilidade, rendimento e menores custos de produção sem abrir mão das características extremamente críticas para a qualidade dos produtos [2].

4.2 - Ferros fundidos

É um termo habitualmente utilizado para denominar as ligas Ferro-Carbono-Silício. Utilizando o diagrama de equilíbrio ferro carbono apresentado na figura 1, onde é possível especificar o ferro fundido como uma liga ferro-carbono, na qual o carbono esteja presente em percentuais maiores que 2%, seja na forma de grafita ou na forma combinada.

Figura 1. Diagrama de equilíbrio Fe-C
Adaptado: Callister, 2008



Contudo, usualmente considera-se o ferro fundido, uma liga ternária de Fe-C-Si, observando que o silício se apresenta naturalmente junto com o carbono, podendo estar em porcentagens similares ou, algumas vezes, maiores que o próprio carbono (entre 1 e 3%), podendo ou não haver em sua composição outros elementos de liga [7,8].

4.3 - Diagrama de fases

Uma análise do diagrama de fases do sistema Fe-C auxilia no entendimento das particularidades envolvidas na solidificação dos ferros fundidos, condições estas que podem ser de duas formas distintas:

- solidificação segundo o diagrama estável;
- solidificação segundo o diagrama metaestável;

Uma liga de ferro fundido que contenha 4,3% em peso de Carbono, isotermicamente resfriada, segundo as condições de estabilidade, passa por duas reações, que resultam nas transformações de fase: contemplando a reação eutética, que é caracterizada pela decomposição uma fase líquida em duas sólidas durante a solidificação ou, contemplando a reação eutetóide, caracterizada pela decomposição de uma fase sólida em outras duas fases sólidas.

Assim, considerando as condições descritas para uma solidificação de reação eutética, segundo o diagrama estável, teremos o líquido se transformando em austenita e grafita (austenita + grafita), já na reação eutetóide teremos a transformação da austenita em ferrita e grafita (ferrita + grafita).

Do mesmo modo, porém considerando a solidificação segundo o diagrama metaestável e a reação eutética, teremos o líquido se transformando em austenita e cementita (austenita + cementita), e na reação eutetóide teremos a austenita transformando-se em ferrita e cementita (ferrita + cementita)[8]

4.4 - Ferro Fundido Nodular

Esta liga, como descrito no próprio nome, configura-se como a classe dos ferros fundidos que contemplam em sua estrutura a grafita em forma de nódulos ou esferoides. Estas grafitas presentes, pelo seu formato, evita a indução matriz do efeito de descontinuidade ou interrupção, independentemente se a mesma seja ferrítica ou perlítica, melhorando assim suas propriedades de ductilidade, de tenacidade e elevando os valores de alongamento, aliados à boa resistência mecânica, a ao também elevado limite de escoamento, quando comparado ao ferro fundido cinzento e a alguns tipos de aços-carbono [8,9].

O ferro fundido nodular apresenta como característica principal, elevadas propriedades mecânicas e, assim como os outros tipos de ferro fundido, tem sua qualidade diretamente ligada à matriz obtida e a disposição do carbono microestrutural (grafita ou carboneto). Estas características conduzem às propriedades e determinam limites do fundido, influenciadas também pela composição química e presença de impurezas ou defeitos microestruturais.

Sendo uma liga ternária e tendo como constituintes os elementos ferro, silício e o carbono, necessita em sua composição da presença de pelo menos um elemento nodularizante que induza a formação de grafita esferoidal [8,9,10,11].

Pelo fato da grafita induzir efeitos de descontinuidade e concentração de tensões na matriz obtida e, ainda, apresentar resistência mecânica muito baixa, a forma desta grafita (esfera) nesta liga, torna-se o grande diferencial, quando o enfoque é propriedades mecânicas. A forma esférica pode ser traduzida em menores efeitos de concentração de tensões, resultando em melhores propriedades mecânicas [8,10].

4.4.1 - Obtenção do ferro fundido nodular

A obtenção de uma liga onde a grafita se apresente em forma de nódulos é realizada através da introdução de alguns elementos ao ferro fundido. Pelo fato de induzirem a grafita à uma forma final esferoidal ou nódulos, estes elementos são denominados nodulizantes e o processo aplicado a este fim, nodulização (nodularização).

Desde a exposição de Helton Morrogh em maio de 1948 durante uma reunião da American Foundrymen Society onde, na ocasião, fora exposta uma liga ferro-carbono-silício constituída de esferóides de grafite, conseguidos diretamente do processo de fusão, e do desenvolvimento de esferóides de grafita utilizando o magnésio, apresentado por representantes da International Nickel Company, tem se aprimorado a tecnologia de fabricação, principalmente quanto às etapas do processo, objetivando a obtenção de materiais superiores em relação às propriedades mecânicas, uma maior estabilidade do processo, com melhor rendimento e menores custos produção. Uma das etapas do processo considerada de maior importância para a obtenção e para a manutenção das propriedades dos fundidos em nodular, é o tratamento do banho metálico. Para garantir a precipitação grafítica de forma esferoidal têm-se otimizado as técnicas de nodulização e, para garantir solidificação segundo a reação eutética estável em aversão à metaestável, as técnicas de inoculação. Estas etapas do processo são extremamente críticas e categóricas para a qualidade do produto[11,12,13].

Estes ferros fundidos são, geralmente, compostos de uma liga ternária hipereutética, constituída por Fe-C-Si (mais que 2%Si) e a sua obtenção necessita da transferência do metal de um forno à uma panela de nodularização, onde há a deposição de liga nodulizante (Fe-Si-Mg 5 a 10%), comumente no fundo da panela e entre 1 a 2%, que apresentam como objetivos principais, a desoxidação e a dessulfuração e do metal líquido [14,15,16,17].

O elemento mais utilizado para esta finalidade é o magnésio devido ao seu baixo custo, comparando-o aos outros nodulizantes. Este elemento carrega a necessidade de que fique retido na peça, teores entre 0,035% a 0,055%, para que seja assegurada a concepção de grafitas em forma de nódulos ou esferóides. A forma de esferóides de grafita concentram menores quantidade de tensão, assim sendo, a influência mais significativa nas propriedades da liga passa a ser da matriz, chegando a 70% das propriedades mecânicas e físicas e é controlada pela inserção de elementos de liga como o cobre ou o estanho [14,17].

A obtenção de um fundido em nodular, inicia-se utilizando uma carga composta por gusa, sucata, retorno do processo (canais, massalotes e peças refugadas) e ferros ligas, então o material é fundido. Depois de fundido, porém antes do vazamento, é verificada e corrigida sua composição química, quando necessário.

Então, são iniciadas as etapas do processo que são extremamente críticas e categóricas para a qualidade do produto, a inoculação e a nodularização [14,15,18].

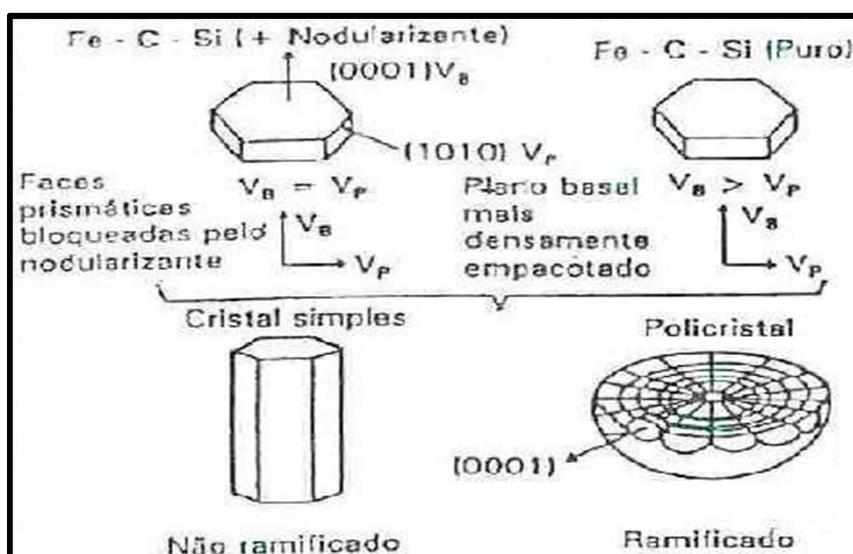
4.4.1.1 - Nodularização

O processo de nodulização é iniciado com a liga em estado líquido, através da adição à liga, de elementos que induzam à formação da grafita em forma de nódulos. Além do magnésio há vários elementos que atuam no banho metálico que apresentam potencial para a nodulização como: cálcio, cério, bário, bismuto, alumínio, zinco, silício, entre outros, porém, nem todos os elementos desenvolvem um potencial para a fabricação de fundidos nodulares, em escala industrial [18].

Por questões econômicas principalmente, o elemento nodulizante de maior utilização é o magnésio, que atua como grande desoxidante e dessulfurante, propriedades que tem papel fundamental na obtenção da grafita em nódulos, visto que este elemento remove enxofre e o oxigênio da liga, transformando as energias interfaciais beneficiando o desenvolvimento da grafita segundo o plano basal, cuja característica é a formação de nódulos [18].

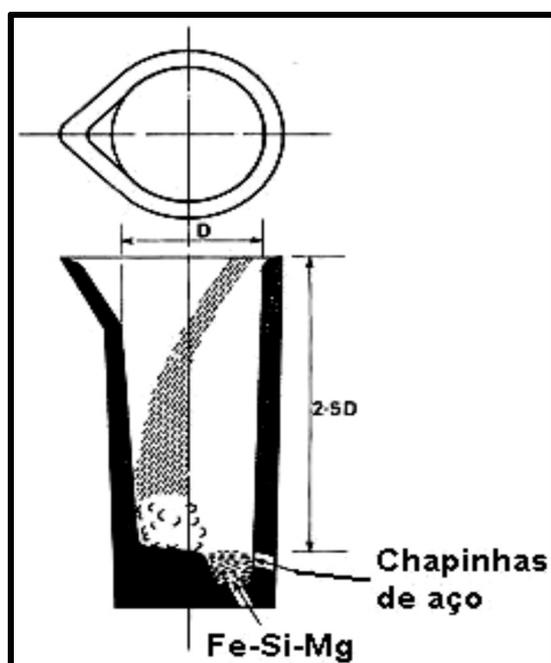
A figura 2 demonstra a variação do crescimento no plano basal da grafita influenciado pela ação do magnésio.

Figura 2. Mecanismo de crescimento da grafita
Adaptado: Lopes 2006



Existem variadas técnicas de realização do processo de nodulização e, o mais comum, utilizado no vazamento das amostras deste trabalho e mostrado esquematicamente na figura 3, é denominado sanduíche. Esta técnica consiste na utilização de uma panela de tratamento que tem um pequeno degrau no fundo, no qual é depositada a liga nodulizante, coberta com pequenas chapas de aço ou sucata fina, de ferro ou aço, sendo e o metal líquido transferido para esta panela pelo lado oposto ao depósito da liga nodulizante [11].

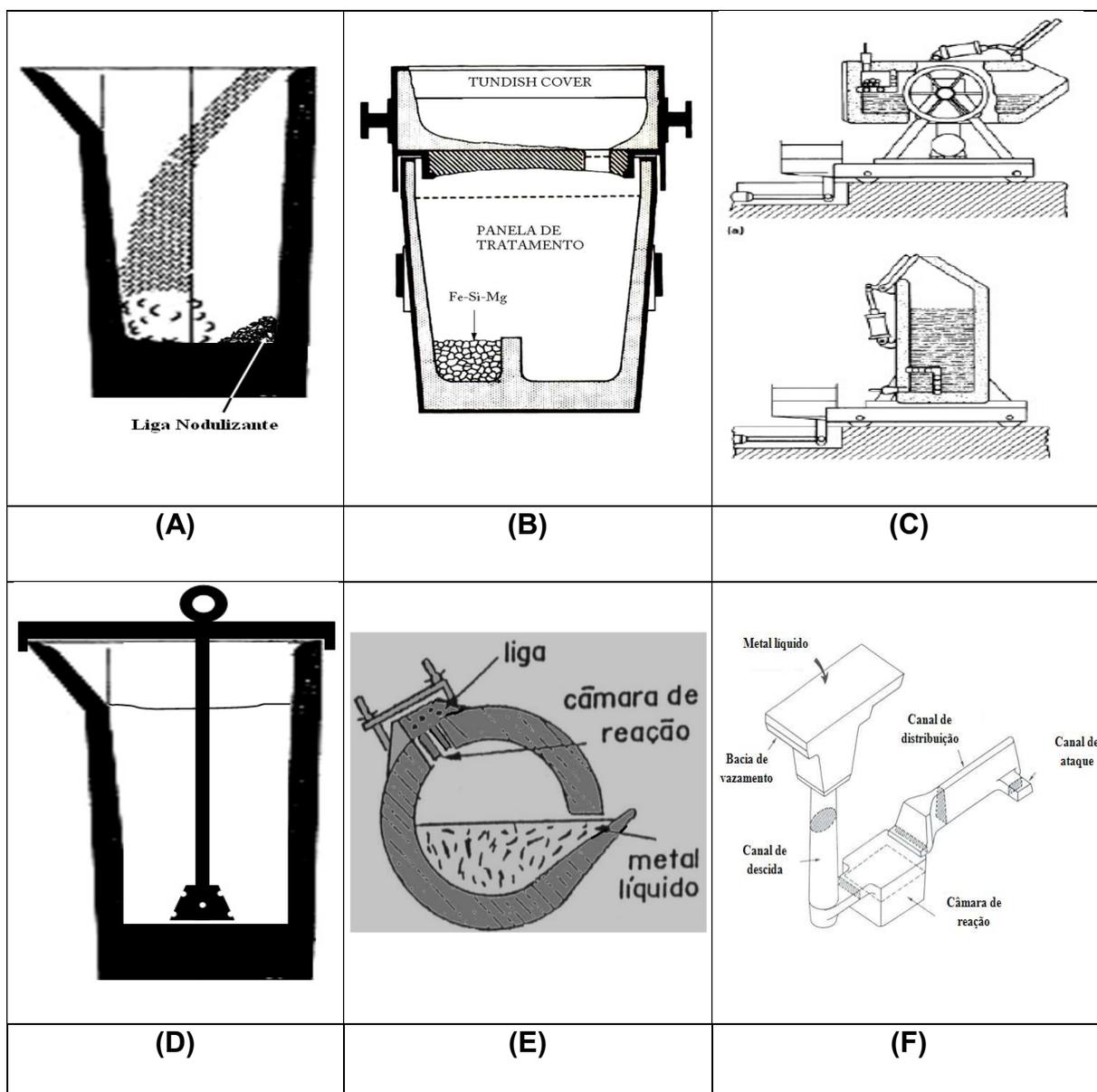
Figura 3. Esquema da técnica de nodulização “sanduíche”
Adaptado: Lopes 2006



Outras técnicas de nodulização, como simples transferência, tundish cover, conversor GF (Georg Fischer), imersão por sino, panela rotativa e in mold, são mostradas esquematicamente na figura 4. Existem ainda outras técnicas como plug-poroso, injeção de gás, panela de pressão, panela com grelha, pont-a-mousson (map), vortex, t-nock, flotret, t.i.p (treatment, inoculation, pouring), fio de magnésio, e cada qual tem sua técnica de utilização específica, aplicação, vantagens e desvantagens e são tratadas em bibliografias específicas devidos às suas particularidades [14].

Independente da técnica utilizada, o importante no processo é a reação do magnésio. Após esta reação, os gases e vapores que atravessam o banho metálico, e que têm grande afinidade com o oxigênio e com o enxofre, diminuem as concentrações destes elementos, promovendo a formação da grafita esferoidal [16,17,18].

Figura 4. Técnicas de nodulização: (A) - simples transferência; (B) - tundish cover; (C) – conversor GF (Georg Fischer); (D) – imersão por sino; (E) – panela rotativa; (F) in mold
Adaptado: Lopes 2006 e Nascimento 2009



A eficiência das ligas ou dos elementos nodulizantes está atrelada à capacidade de formação da grafita em formato esferoidal e devem possuir algumas características como:

- a) afinidade com o enxofre;
- b) afinidade com o oxigênio;
- c) baixa solubilidade no ferro fundido;
- d) tendência à segregação durante a solidificação;
- e) baixa solubilidade na grafita.

Estas características induzem a uma reação estável que possibilitam o crescimento da grafita, em formato preferencial, de nódulos [18, 16].

A utilização como elemento nodulizante, do magnésio, leva à necessidade de alguns cuidados quanto à composição química final (magnésio residual). Não se deve exceder certos limites, pois há risco de formação de carbonetos durante a solidificação e a necessidade tratamento térmico posterior e, ainda, contribuir com formação de grafita que não seja em forma de nódulos (degenerada) [16,17,18].

Em contrapartida, a apresentação de teores muito baixos, oferecem o risco de não obtermos a grafita unicamente na forma de nódulos. Apesar de terem registros de, sob algumas condições, teores de até 0,02% sejam suficientes para provocar a nodulização, sendo recomendados valores entre 0,04% e 0,08% [16,18].

Outras recomendações para o tratamento de nodulização são:

- a) o teor de enxofre esteja baixo, para melhorar o grau de nodulização e a eficiência do nodulizante;
- b) carbono equivalente, ou seja: $(\%C + ((\%Si + \%P)/3))$ esteja entre 4,35% e 4,65%, evitando a formação de carbonetos e de grafitas que não sejam em nódulos;
- c) se realize o tratamento entre 1480°C e 1510°C, reduzindo a perda de eficiência do nodulizante;
- d) o vazamento ocorra em até 10 minutos após o tratamento, evitando a perda de eficiência do nodulizante e a formação de carbonetos [14,19].

4.4.1.2 - Inoculação

O objetivo principal do tratamento de inoculação é o de realizar a grafitização do banho metálico, ou seja, formar a grafita durante a solidificação através da redução do superresfriamento, através da adição de elementos grafitizantes, geralmente com altos teores de silício, acrescidos momentos antes do vazamento [15,16,18].

São utilizados, geralmente por meio de ligas, inoculantes tipo Fe-Si em teores de 0,5% a 1,0% e, ligas contendo Sr, Ba ou Ce, considerados mais eficientes, em teores entre 0,3 a 0,6%, para a inoculação para os fundidos nodulares, que ainda, dependem de algumas variáveis de processo e das condições grafitizantes do banho metálico [15,18].

Dentre as variáveis que influenciam o processo de inoculação, podemos citar algumas delas:

- a) a composição do metal base: o carbono equivalente, pois quanto maior seu valor, maior a probabilidade de formação de grafita no resfriamento;
- b) teores residuais de oxigênio: os inoculantes são geralmente desoxidantes muito eficientes, assim sendo, são consumidos durante a desoxidação do metal líquido, atenuando a eficiência de suas principais funções que são a formação e/ou o aumento da nucleação gráfitica.
- c) a temperatura de inoculação: alta, pode destruir os núcleos efetivos de formação da grafita; baixa, pode tornar a dissolução do inoculante incompleta;
- d) o volume de inoculante utilizado que, até determinado limite promove o aumento de núcleos depois, seu efeito não é muito observado;
- e) presença de escória: reduz a eficiência do inoculante;
- f) presença de óxidos: um percentual do inoculante utilizado, é consumido durante o processo de redução destes óxidos;
- g) a granulometria: as partículas devem ser satisfatoriamente pequenas para se dissolverem rapidamente e grandes para que não flitem no banho, antes da completa dissolução;
- h) o tempo decorrido entre o processo de inoculação e a solidificação: reduz a eficiência do inoculante com o chamado tempo “*fading*”.

- i) a técnica utilizada para a inoculação e tipo de inoculante, influenciam os resultados ao término do processo [14,15,16,17,18].

Além das variáveis descritas, uma inoculação eficiente depende também do processo produtivo, da composição química do fundido, da geometria das peças a serem produzidas e, torna-se muito mais efetiva à medida que os inoculantes são adicionados quanto mais próximos ao início do processo de solidificação [14,15].

O processo de inoculação é necessariamente realizado após o processo de nodulização ser iniciado. O procedimento mais comum é adição do inoculante na própria panela de nodulização. O metal líquido é transferido à panela de tratamento, posteriormente, restando aproximadamente 1/3 do volume total a serem transferidos, é adicionado inoculante até que se termine o vazamento. Existem outras maneiras e procedimentos utilizados para o processo de inoculação [14,15].

Há também, técnicas utilizadas para a reduzir o efeito do “*fading*”, onde uma das técnicas mais difundida é a de pós inoculação. Esta técnica pode ser, dependendo da região, entendida de duas formas:

- inoculação em duas panelas: onde o processo de nodulização é realizado em uma panela, retirada da escória formada e após estas etapas o banho metálico é enviado à uma segunda panela para que seja realizado o tratamento de inoculação.

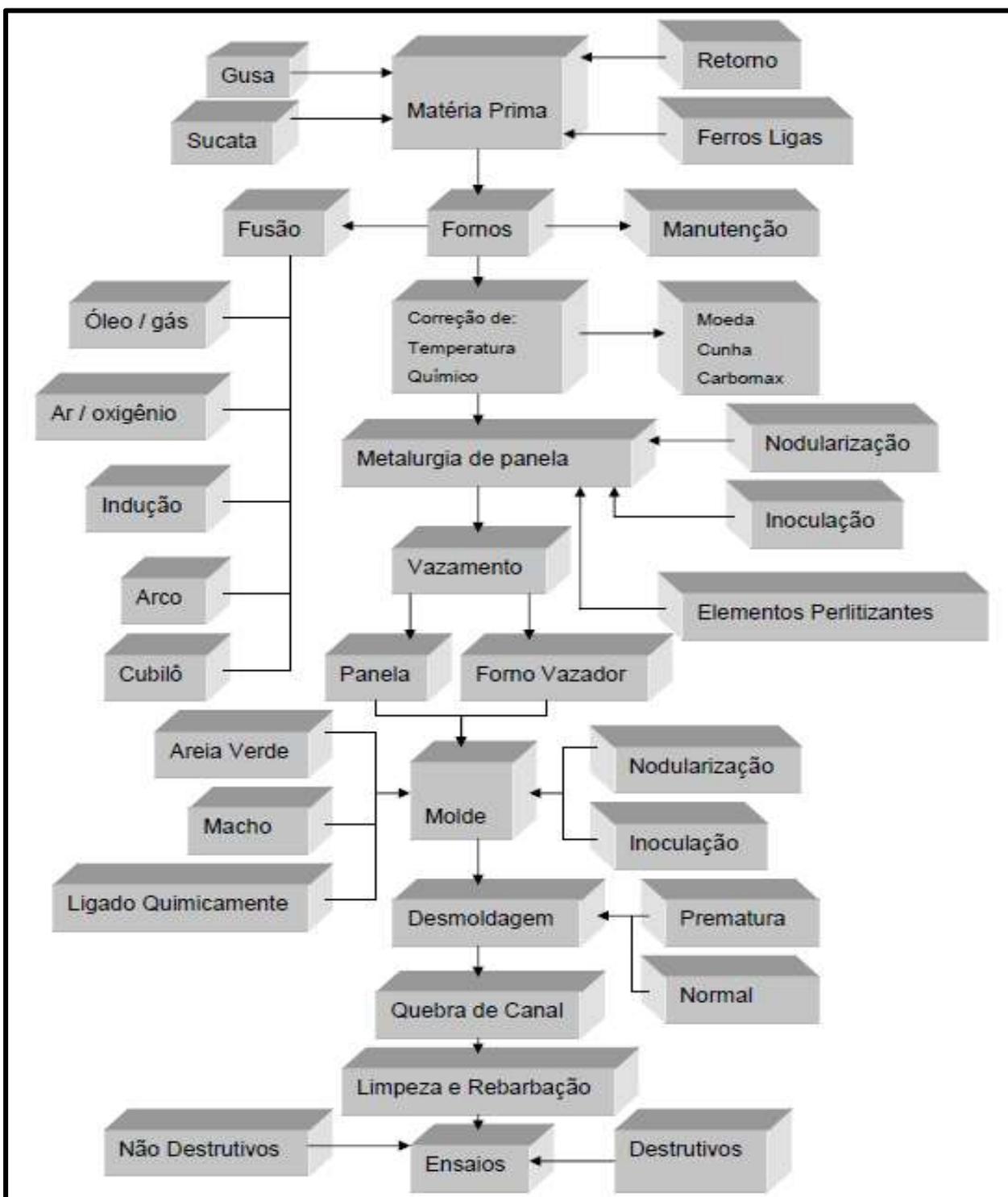
- pós inoculação in mold: neste caso, são empregados inoculantes em pó ou pedra que são incorporados ao metal, pelo jato metálico, durante o vazamento dos moldes [14,15,18].

Antes do vazamento são realizados os tratamentos de panela com os objetivos de garantir a qualidade do ferro fundido, a nodularização ou adição de liga nodulizante, criando assim as condições benéficas à formação do ferro fundido nodular, a inoculação ou adição de elementos que promovem a nucleação do banho, evitando o coquilhamento ou ferro branco nos ferros fundidos nodulares e cinzentos e a introdução de elementos de liga para a manipulação e o controle da microestrutura e conseqüentemente das propriedades mecânicas. . Após o vazamento e completa a solidificação interna dos moldes, que ainda podem conter partes do processo de nodularização e inoculação, os fundidos são desmoldados, têm seus canais e massalotes retirados, e na sequência acontecem a limpeza e a rebarbação. Após estas etapas e obtidas a peça bruta de fusão, normalmente são realizados os

controles de qualidade necessários para aferição das propriedades do fundido [14,15,18].

A figura 5 apresenta o fluxograma de obtenção do ferro fundido nodular.

Figura 5. Fluxograma de obtenção de um fundido em nodular
Fonte: (Nascimento 2009)



4.5 – Defeitos do Ferro Fundido Nodular e suas características

Existem defeitos típicos, diretamente ligados aos ferros fundidos nodulares, como afirmam Nascimento [14], Santos e Albertin [20], dos quais podemos destacar principalmente:

a- Defeitos de composição química:

- a composição da liga metálica determina as características microestruturais do fundido, as propriedades mecânicas e alguns defeitos microestruturais. Um dos problemas ligados à composição é a geração de partículas duras e indesejáveis, que têm como efeito o desgaste prematuro das ferramentas de usinagem [14,20].

b- Deficiência na nodularização:

- as peças fundidas com deficiência de nodularização apresentarão em sua estrutura grafitas deformadas, ou seja, formas diferentes dos esferóides e isto reduz as propriedades mecânicas das mesmas [14,20].

c- Flotação de grafita:

- este defeito está geralmente ligado à composição química, altos teores de C e Si geram um alto volume de grafitas e algumas acabam “flutuando” e se depositam logo abaixo da superfície externa do fundido. Este tipo de defeito promove uma redução das propriedades mecânicas [14,20].

d- Inclusões:

- com origem na areia do molde, estas podem se depositar nas paredes externas ou nas internas da peça. Seus efeitos incluem problemas de usinagem, devido a natureza abrasiva dos grãos de areia, defeitos superficiais ou vazios deixados no material quando extraídas [14,20];

- com origem nas escórias, estas mostram-se com cores escuras e diferentes formas nas superfícies das fraturas. Também geram redução das propriedades mecânicas e microestruturais [14,20].

e- Rechupe:

- por definição, é um defeito que ocorre durante o processo de solidificação gerando uma falta de material, tendo como causa principal a baixa eficiência do sistema de enchimento e/ou do sistema de alimentação [14,20].

f- Porosidade:

- são os pequenos poros presentes no fundido. Originados principalmente quando os gases presentes no metal ainda líquido, não são eliminados totalmente no intervalo do vazamento até a completa solidificação, logo, causando defeitos microestruturais, levando à fragilização dos fundidos [14,20].

g- Coquilhamento:

- este defeito caracteriza-se pela a formação de superfícies duras. Originadas durante o rápido resfriamento de alguns pontos ou na nodularização deficiente. Estas regiões acabam gerando problemas às ferramentas de usinagem [14,20].

h- Trinca e deformação:

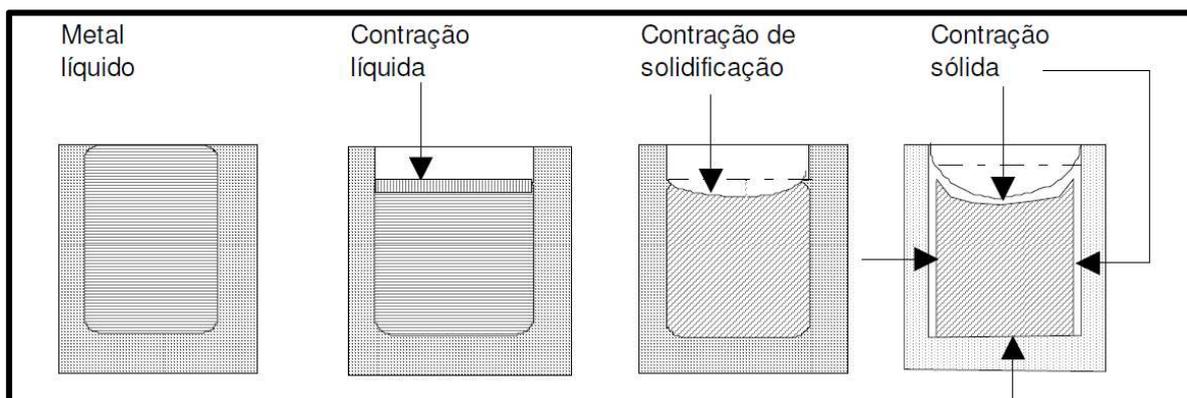
- ocorre quando as tensões induzidas pela solidificação são maiores que a resistência à deformação da liga, levando à deformação ou até trincas nos fundidos. Tem sua origens associadas ao baixo teor de carbono, a nodularização insuficiente e a alta taxa de resfriamento muito rápido [14,20].

4.6 - Formação de Rechupe e Frentes de Solidificação

O rechupe ou chupagem é considerado, em fundição, uma descontinuidade, isto é, são vazios que se apresentam nas estruturas das peças provenientes da contração do metal ou da liga metálica durante o seu arrefecimento e solidificação. São classificados como um dos principais defeitos dos fundidos [20,21,22,14].

Os rechupes formam-se durante a passagem do metal no estado líquido para o estado sólido. Esta transformação do estado vem seguida de variações volumétricas, após o vazamento da liga no molde, e esta sofre um resfriamento, conforme esquema representativo da figura 6 [23,24].

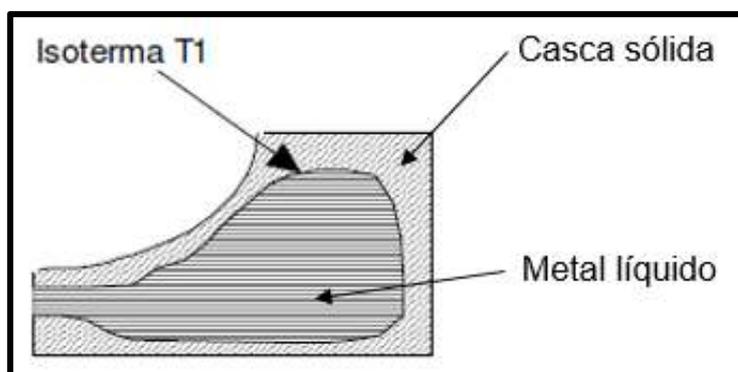
Figura 6. Sequência de contração sofrida pela maioria das ligas
Adaptado: Silva 2008



Utilizando como amostra parte de uma peça, simulada na figura 7 podemos iniciar o entendimento da análise do mecanismo de formação do rechupe.

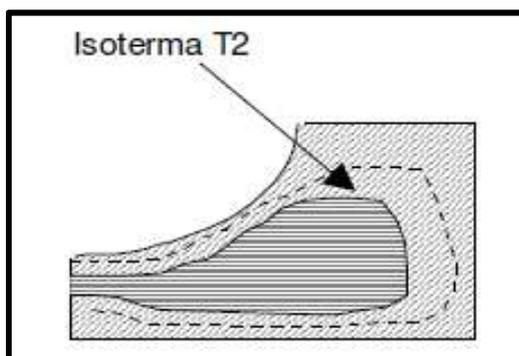
A técnica utilizada nesta análise, considera que, após o vazamento se inicia uma formação progressiva de uma casca metálica sólida na interface entre o metal e o molde. Esta casca metálica formada pode variar com o design da peça e/ou com a velocidade de resfriamento induzida. Estas estruturas formadas, quando analisadas em função do tempo, são delimitadas por isotermas [25].

Figura 7. Isotherma de solidificação no instante t_1
Adaptado: Silva 2008



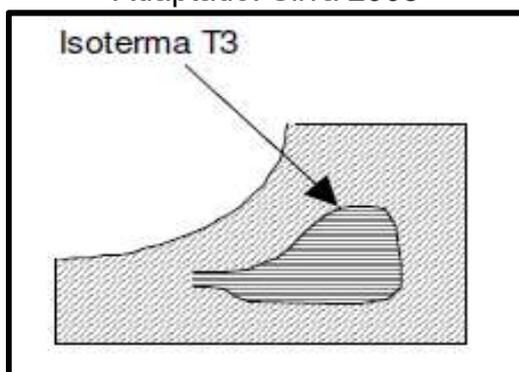
Assim, sucessivamente, formam-se as isothermas que definem as espessuras das cascas metálicas (figura 8).

Figura 8. Isotherma de solidificação no instante t_2
Adaptado: Silva 2008



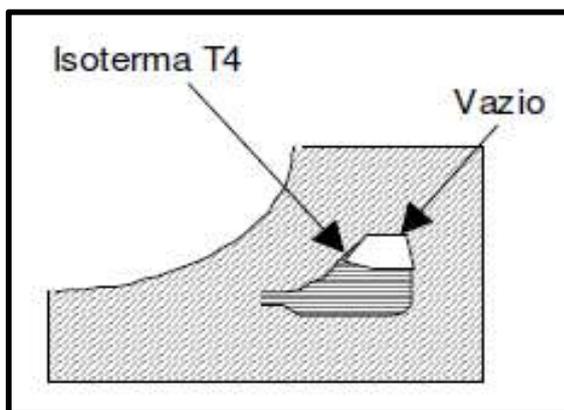
Até o momento no qual a parte mais fina ou a parte submetida a maior taxa de resfriamento se solidifica, enclausurando um volume de metal líquido (figura 9).

Figura 9. Isotherma de solidificação no instante t_3
Adaptado: Silva 2008



O volume líquido restante, continua com o processo de resfriamento e com a contração a que está submetido, conseqüentemente provoca a formação de um vazio, conforme apresentado na figura 10.

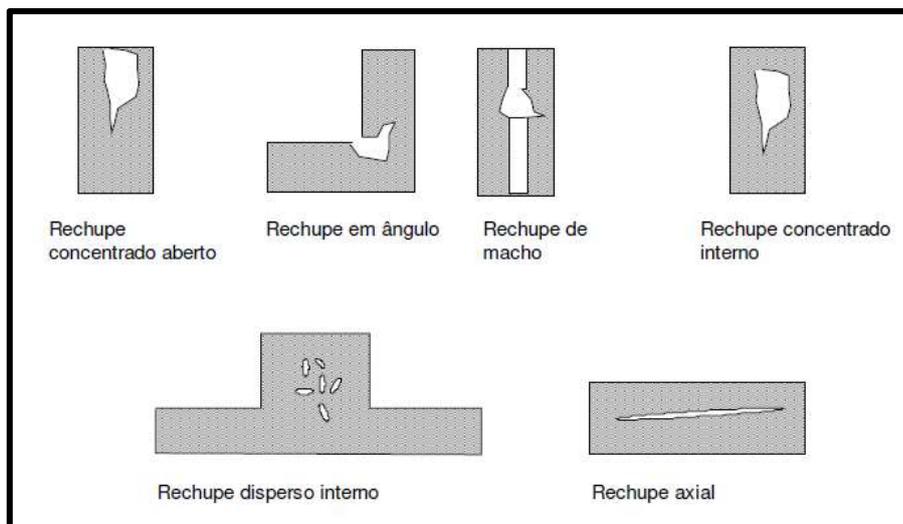
Figura 10. Isoterma de solidificação no instante t_4
Adaptado: Silva 2008



A posição, configuração e o tipo de rechupe ou vazio, está diretamente ligada à forma adquire pelas isotermas bem como a distância entre elas, sendo estas dependentes da geometria e da forma típica de solidificação do fundido.

Também dependente destas variáveis, são os tipos de rechupes mais comumente encontrados, dos quais, os principais são apresentados na figura 11.

Figura 11. Tipos de rechupe
Adaptado: Silva 2008



O conhecimento sobre o tipo de rechupe e das variações volumétricas ocorridas durante o resfriamento, conforme o gráfico apresentado na figura 12, é de grande importância pois, estas características apresentam informações de como ele é formado e as principais formas de evitá-lo.

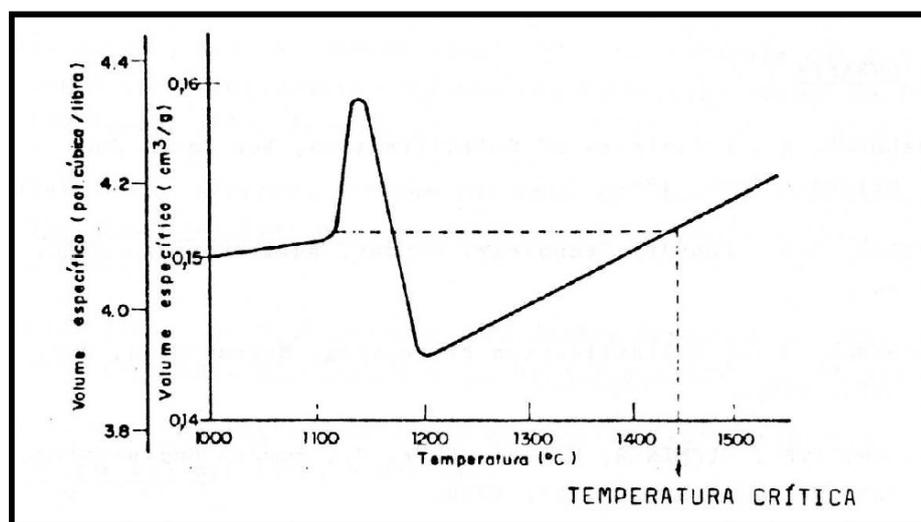
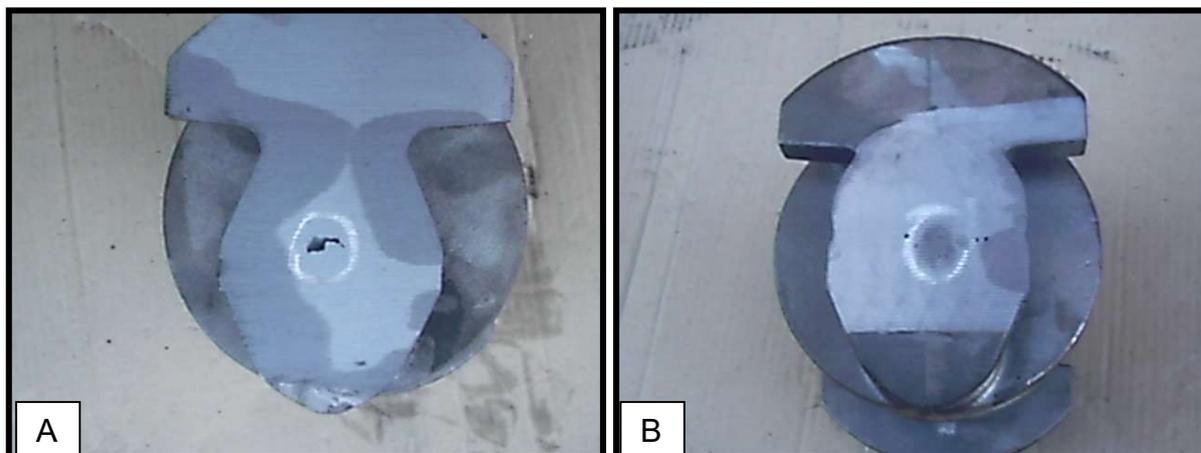


Figura 12. Variação do volume durante a solidificação do ferro fundido
Fonte: Fuoco 2007

Como afirma Nascimento, o rechupe que se apresenta de forma regular ou contínua em uma parte específica da peça, provavelmente é o resultado de um design ou processamento incorreto. Se o rechupe é do tipo esporádico, a provável causa é o descontrole das variáveis de fundição, dentre as quais destacam-se: a resistência do molde confeccionado em areia a verde, variação da temperatura de vazamento, variação da composição química com ênfase para carbono, silício e magnésio, quantidade de nódulos, quantidade de carbono na forma de grafita e volume de carboneto, e o tipo e funcionamento dos massalotes [14].

Ainda segundo Nascimento, o rechupe pode se apresentar como um grande vazio (primário) ou como uma porosidade menor, esponjosa e dendrítica (secundário), abertos ou fechados. A figura 13 apresenta o aspecto visual de um rechupe primário e de um rechupe secundário. Estes vazios aparecem com maior frequência nas regiões de mais espessas, onde é necessário um maior tempo até a solidificação e têm a tendência de fornecer metal líquido às regiões mais finas. Os rechupes ocorrem em uma região específica ou dispersos pela peça [14].

Figura 13. Rechupe primário (A - grande vazio), rechupe secundário (B - poros menores) em virabrequim
Fonte: arquivo BR Metals



Os rechupes podem ser externos, geralmente observados a olho nu ou internos, geralmente detectados por testes específicos e conforme afirma Nascimento [14], podem ser causados por algumas variações de processo como:

- Temperatura de vazamento

Possivelmente aumenta a quantidade de rechupes primários, pois quanto maior a temperatura no interior do molde menor será a quantidade de nódulos e maior o seu tamanho, sendo maior o tempo para que ocorra a solidificação, lembrando que esta condição deve ser compensada pela utilização de massalote [14].

- Número de nódulos

Um baixo número de nódulos pode não causar muita pressão de expansão da grafita, levando à formação do rechupe enquanto um excesso de nódulos pode criar excessiva pressão devido à grande expansão do metal e novamente aumentar a probabilidade de ocorrência do rechupe [14].

- Dureza e resistência do molde.

Estas propriedades devem garantir que o molde suporte as pressões de expansão e crescimento da grafita pois, caso não as suporte, a dilatação das paredes

e a consequente perda desta pressão levará ao surgimento de porosidades de rechupe [14].

- Sistema de alimentação.

Os massalotes devem ser dimensionados de forma a atender as necessidades de alimentação da área e terem o posicionamento adequado, de acordo com a distância em que tenha uma atuação eficiente (distância de alimentação) [14].

- Sistema de enchimento

Os canais devem garantir uma distribuição uniforme do metal, gradientes de temperatura e velocidades de enchimento compatíveis, visto que vazamentos muito lentos podem criar condições que favorecem o rechupe [14].

- Projeto da peça

Um design que contemple grandes massas isoladas que originem pontos quentes isolados durante a solidificação, criam condições propícias à formação de rechupes [14].

- Composição química

O domínio sobre os percentuais de elementos como carbono, cromo, magnésio e silício, e a importância destes elementos na solidificação da liga, se faz imprescindível, tanto na prevenção à formação de rechupes quanto para apontar a uma possível solução, quanto ao tipo de rechupe formado [14].

Considerando sua influência direta no intervalo de solidificação da liga, a composição química tem, ao mesmo tempo, influência na frente de solidificação que se desenvolve após o vazamento do metal, iniciando na parede do molde e crescendo em direção ao centro térmico e, conseqüentemente no potencial rechupe, como mostrado nas figuras 14 e 15.

Figura 14. Esquema de uma liga de pequeno intervalo de solidificação e o recheio característico
Adaptado: Nascimento 2009

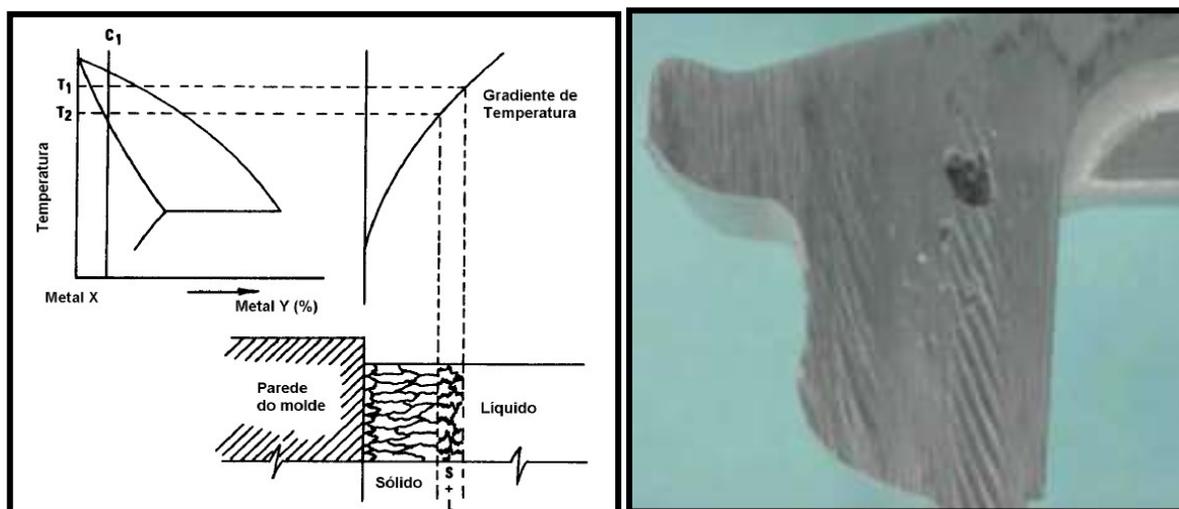
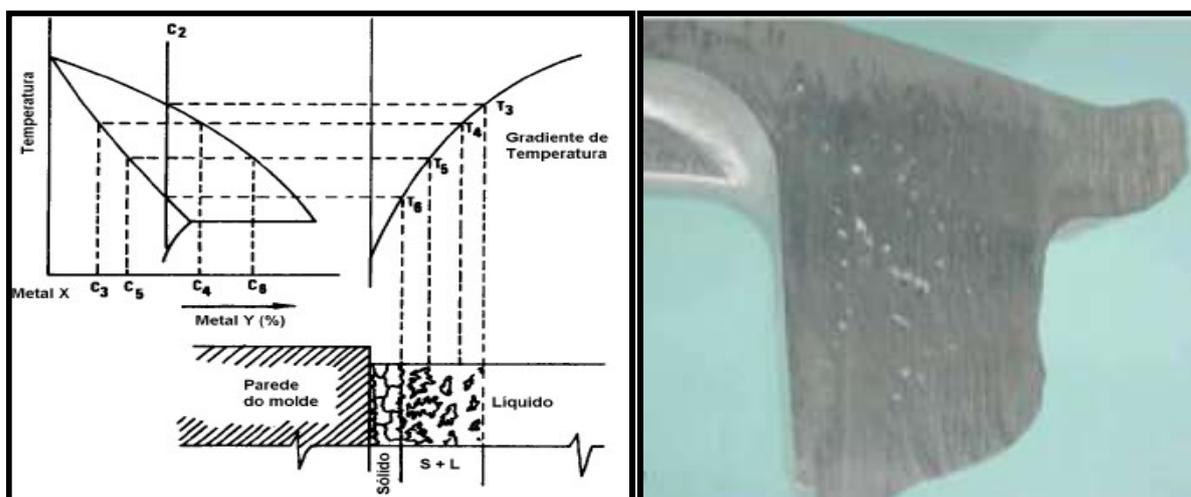


Figura 15. Esquema de uma liga de grande intervalo de solidificação e o recheio característico
Adaptado: Nascimento 2009



Tratando de um defeito de grande criticidade e comumente observado após a usinagem, fator que contribui para onerar o processo, o levantamento de dados referentes ao defeito é uma das principais armas no combate ao mesmo. O conhecimento sobre o mecanismo de solidificação da liga utilizada, também é de vital importância para a prevenção ao aparecimento e para solução deste tipo de defeito [14,22,23].

As formas mais eficazes de prevenção à formação do rechupe consistem em eliminar as fontes causadoras tão logo as identifiquemos conforme expõe Nascimento [14] e, à algumas delas podemos direcionar pequenos esforços a fim de conseguirmos grandes impactos, como o controle dureza do molde de areia e da resistência do mesmo. Seguir as recomendações para definição dos sistemas de enchimento e de alimentação, mesmo que isto não garanta a ausência de rechupes, porém ignorá-la certamente resultará em problemas. Incluem-se também, a definição e controle do tempo de vazamento, da temperatura de vazamento, a possibilidade de utilização de luvas e também a utilização de resfriadores, direcionamento da solidificação e controle da nucleação [14,15,16]. Outras formas de prevenção podem ser mais difíceis de implementar como a alteração da geometria da peça de modo a evitar pontos quentes isolados e alteração da composição química que muitas vezes está atrelada a propriedades e ou requisito do cliente [14,23,24].

4.7 - Massalotes e Luvas

Uma das formas mais eficientes de combate aos rechupes primários é o sistema de alimentação ou massalotagem, pois garantem uma reserva de metal para compensar a contração primária, porém, para que sejam eficientes e não apenas onerem o processo, devem ser bem calculados e bem posicionados no projeto do fundido[14,23,24].

Como orienta José Geraldo da Silva [23], um sistema de alimentação eficiente deve seguir três regras básicas de concepção: a regra do módulo de resfriamento, a regra da contração volumétrica e a regra da zona de ação.

De forma resumida, podemos entender as regras básicas da seguinte forma. A regra do módulo de resfriamento é o cálculo realizado para a análise térmica do sólido geométrico a ser alimentado, representado por um valor numérico que é o resultado da divisão do volume do sólido pela superfície de resfriamento, delimitada pelas áreas que trocam calor em contato com o molde. Desta forma o módulo calculado para o massalote deverá ser maior que o da região a ser alimentada [14,23,24].

A regra da contração volumétrica se traduz na necessidade conferida ao massalote de uma reserva de um volume pré-definido de metal líquido, que será

utilizada como compensação à contração volumétrica da peça ou região a ser alimentada. Na prática, para economizar tempo na definição das regiões a serem alimentadas, é utilizada uma técnica denominada método dos círculos inscritos, que se trata basicamente de inscrever ou desenhar círculos em regiões da peça e que, grosseiramente substitui as duas primeiras regras direcionando os esforços analíticos às regiões onde se obtém os maiores círculos se valendo da premissa que se solidificam posteriormente. O uso desta técnica impõe ao massalote a ser calculado para alimentar determinada região, um círculo inscrito maior que a área em questão, induzindo assim que o perfil do massalote seja aproximadamente cilíndrico [14,23,24].

A regra da zona de ação, que por definição é a área de atuação do massalote ou a distância em que mesmo atuará ou terá eficiência. Não é o caso do processo Shell Molding, onde se tem pouca liberdade de trabalho no sistema de alimentação. A regra da zona de ação nos auxilia no cálculo do número de massalotes a serem utilizados em um sistema de alimentação e conseqüentemente, seus respectivos posicionamentos, que podem ser definidos pelo gradiente térmicos e centros térmicos, por eles gerados, que permite a obtenção de uma solidificação direcionada aos mesmos [14,23,24].

As três regras resumidamente descritas, são parâmetros primários para a concepção de um sistema de alimentação, porém na prática, a prevenção ao rechupe pode ser complicada, pelo fato das peças fundidas apresentarem formas geométricas bastante irregulares [14].

Um sistema de alimentação eficiente, como também um sistema de enchimento, deve atender a alguns requisitos, como afirma Silva [23] dos quais se destacam:

- o tempo de solidificação – os massalotes devem solidificar-se por último, assim, conter o último metal líquido do conjunto;
- o posicionamento - devem ser posicionados de forma que supram as necessidades impostas pelos pontos mais quentes das peças;
- o volume - devem manter um volume suficiente de metal líquido, que será utilizado para compensar a contração volumétrica do fundido;
- a pressão - devem utilizar o efeito da pressão atmosférica;
- a economia - devem ter o menor peso possível, sem perder, para economia de material e facilidade de remoção e acabamentos posteriores.

Apesar dos vários tipos, de fórmulas e tabelas para as respectivas definições de perfis, o objetivo do sistema de alimentação é a obtenção de peças isentas de rechupe [23].

O desenho de um sistema de alimentação deve ainda contemplar a garganta ou pescoço dos massalotes, que os ligam à peça, carregam a grande responsabilidade e são calculados de forma a fecharem a ligação da região a ser alimentada com o massalote. Os perfis definidos para ação do massalote deve ter sua contração volumétrica compensada pelo volume de metal líquido calculado para o massalote. Este cálculo é também em função do diâmetro do massalote, que é calculado baseado no módulo previamente definido [14,23,24]

Definido o número de massalotes necessários e seus módulos, é possível definir também as dimensões de diâmetro e altura (volume) e pescoço, utilizando fórmulas específicas que, por sua vez são dependentes do tipo de massalote utilizado e, também, se será empregado algum artifício para melhorar sua eficiência [14,23,24].

Um dos artifícios para a melhoria do rendimento do massalote, é a utilização de luvas exotérmicas e isolantes. Luvas isolantes e/ou luvas exotérmicas são utilizadas como revestimento dos massalotes e têm como principal característica a manutenção da temperatura elevada no interior do mesmo, para garantir que o metal se mantenha líquido por um tempo maior, ou seja, que se retarde o efeito da extração de calor neste ponto.

A eficiência das luvas está condicionada à capacidade de abastecer o conjunto com metal líquido, garantindo a alimentação do fundido após o enchimento do molde. O típico funcionamento das luvas é o grande diferencial em um sistema de alimentação e, suas propriedades de reter o calor, no caso das luvas isolantes e de liberar o calor, no caso das luvas exotérmicas podem, até mesmo gerar significativa redução de custos, seja por redução dos níveis de refugo e retrabalho ou por utilização de um menor volume de metal líquido aumentando assim o rendimento metalúrgico sem prejuízos à sanidade das peças com o aparecimento de rechupes [14,23,24].

Conforme informação do fabricante e fornecedor de luvas para várias fundições, e parceiro neste trabalho, inúmeros componentes podem ser utilizados na formulação das mesmas e uma mistura básica envolve um metal oxidável e um agente oxidante capaz de gerar uma reação exotérmica, para as luvas exotérmicas ou um material refratário isolante, para luvas isolantes ou ainda, uma mistura destas duas

características e uma porcentagem de uma aglomerante químico para se fazer a união destes materiais [27].

É de grande importância a realização de estudos, pesquisas e amostras para determinação dos teores a serem empregados, e a respectiva correlação com os resultados obtidos [27].

Genericamente, embora seja considerado um diferencial na fabricação de luvas, alguns componentes empregados na formulação das mesmas são:

- óxido de ferro natural;
- alumínio atomizado;
- salitre do Chile;
- fluorita;
- farinha de madeira;
- cianita;
- mulita;
- areia de sílica;
- silicato de sódio (utilizado como aglomerante das luvas exotérmicas).

Apesar da composição e o meio de fabricação das luvas serem técnicas dominadas pelos fabricantes, existe alguns detalhes exclusivos de cada fornecedor. Há ainda diversos componentes sendo testados e os resultados obtidos podem representar uma melhora na eficiência e no funcionamento destes insumos bem como nos processos de fabricação [27].

Sabendo-se que o alto poder exotérmico de uma luva é originário da reação de um metal, sendo utilizado em maior escala o alumínio metálico, com um óxido de outro metal, sendo o óxido de ferro o mais utilizado, estudos aplicados direcionam a utilização e porcentagem a uma maior eficiência das luvas pois, para o usuário, neste caso as fundições, quanto maior a eficiência da luva menor será a probabilidade de retrabalhos ou refugos, devido à menor incidência de rechupes e segregação por falta de alimentação [27].

4.8 - Virabrequim e sua Produção em Ferro Fundido

O eixo virabrequim é um item de geometria bastante complexa e de extrema relevância em um motor automotivo e tem como função primordial, a conversão do movimento linear alternado advindo dos pistões, em movimento rotativo, que será transmitido às rodas do veículo. Concebido habitualmente por fundição ou por forjamento, esta peça necessariamente passa por processos de usinagem e balanceamento posteriores. Atualmente as operações de usinagem e balanceamento destas peças, são realizadas pelas grandes montadoras em modernos centros de usinagem, totalmente automatizados, onde as peças entram e após várias operações, saem em condições de montagem, sendo bastante comum realizarem, entre uma operação e outra, testes de qualidade em algumas peças [26,27].

A origem destas peças, forjaria ou fundição, induzem às mesmas características especiais. Estas características envolvem principalmente material, que no caso dos virabrequins forjados é o aço e nos virabrequins fundidos, o ferro fundido, sendo que nos primórdios da indústria automotiva no Brasil, havia utilização de virabrequins em aço fundido. A diferença entre o processamento e os materiais empregados na construção, tem influência direta sobre as propriedades mecânicas resultantes.

Comparativamente, os virabrequins forjados fabricados em aço, em função do processamento, apresentam maior resistência mecânica que os virabrequins fundidos, porém, apesar de se mostrarem superiores, atualmente o mercado tem direcionado suas aplicações à veículos mais refinados ou esportivos, onde há maiores solicitações teoricamente, devido ao desempenho associado a estes tipos de veículos. A favor dos fundidos pesa a maior energia utilizada para produção das peças forjadas, tornando o material, o processo e a usinagem mais dispendiosos e o lead time maior [26,27].

Ainda relacionado ao processamento, virabrequins advindos de fundição apresentam dimensões mais próximas às dimensões finais, gerando menores tempos e custos de usinagem. Outra diferença importante é quanto ao acabamento na região de apartação ou divisão dos moldes ou modelos utilizados. As características do processamento induzem aos fundidos, excrescências ou as chamadas rebarbas, menores conforme mostrado na figura 16.

Figura 16. Virabrequim fundido (esq) e virabrequim forjado (dir)
Fonte: Arquivo BR Metals



Quanto à resistência mecânica, há grande vantagem para o virabrequim forjado, pois apresentam menores deformações estruturais, quando submetido aos esforços durante o trabalho, tais como alterações nas medidas de flecha e batimento [26,27].

Quando o assunto em questão é a qualidade geral dos produtos, estudos direcionados possibilitam até mesmo a preferência dos fundidos aos forjados, em alguns casos específicos, como veículos de menores potência e custo.

Atualmente, a quase totalidade de virabrequins fundidos, são fabricados em ferro fundido nodular [21]. Os virabrequins processados pelo forjamento em sua grande maioria, têm seu processo iniciado na fundição, e posteriormente são transformados em perfis específicos para seguirem para o processo de forjamento, garantindo o perfil desejado, necessitando, porém, de passar pelo processo de usinagem para o dimensionamento e configurações finais que o habilitarão para a utilização [26,27].

Há uma tendência à formação de defeitos microestruturais, associada ao processo de fundição, devido às diferentes espessuras de seções e as taxas de resfriamento às quais são submetidas enquanto que no processo de forjamento a tendência é a de reduzir as porosidades e as descontinuidades podendo até extinguir as cavidades internas. Independente do processo utilizado, quando se relaciona com os defeitos oriundos de cada um, é possível reduzir ou eliminá-los através da correta utilização do meio de fabricação e um rigoroso controle de processo [26,27].

Assim como sua utilização preferencial na produção de virabrequins fundidos, atualmente o ferro fundido nodular tem enorme aplicabilidade, seja na indústria automobilística em componentes de motores, eixos, sistema de freios, entre

outros componentes, nas indústrias mecânica, ferroviária, agrícola, naval, química, petroquímica, siderúrgica, têxtil, construção civil, obtenção, transmissão e distribuição de energia, logo, grande importância no mercado de fundidos. Devido a esta condição, apresentam uma enorme necessidade de estudos relacionados à utilização de novas tecnologias para aperfeiçoamento do processo de produção e para atingir a alta qualidade aliada ao menor custo [3,1,9].

4.9 - Simulação Aplicada à Fundição

O processo de simulação, utilizado para fundição, seja inicialmente, no desenvolvimento ou na posterior melhoria das peças obtidas, é de uma enorme importância para a consolidação das indústrias como fornecedores de produtos e serviços com alto valor agregado e alta tecnologia e às elevando a posições de liderança no mercado [28,3,5].

Buscando atender ao mercado que, a cada dia apresenta concorrências mais fortes e preparadas e exige serviços cada vez melhores, há ferramentas disponíveis para simulação numérica que possibilitam prever alguns dos fenômenos relacionados ao enchimento dos fundidos e sua solidificação, como as características dos perfis de temperatura, velocidade e pressão do fluxo de metal, as características do modelo de solidificação assumido, a incidência de regiões predispostas à formação de defeitos e, possibilitam também prever a microestrutura final, as propriedades mecânicas associadas e as tensões residuais [28,3,5].

Porém não é incomum encontrarmos no ambiente das fundições, principalmente onde existem funcionários mais tradicionais, várias dúvidas a respeito dos processos de simulação, da assertividade dos resultados, das melhorias inferidas ao processo de fundição, ou seja, a funcionalidade, a eficiência e a eficácia dos referidos processos. Esta resistência ainda encontrada pode, algumas vezes, ser explicada pelos resultados encontrados ou propostos, não representarem a melhoria esperada. A grande dificuldade para obtenção de eficientes resultados está diretamente ligada ao fato de que muitas vezes não há um bom conhecimento do processo a ser estudado, suas características particulares, o típico funcionamento dos

materiais e equipamentos utilizados na fundição das peças, dos quais serão simulados os resultados [28,3,5].

Existem informações valiosas para a simulação como a composição típica da areia utilizada na moldagem e macharia, o tipo de moldagem, a rigidez e a compactação do molde, , tempo de desmoldagem, composição e características do metal de base, tratamentos de nodulização e inoculação, composição química final prevista, do vazamento, condições de troca de calor do fundido e a precisão entre o projeto de fundição e o ferramental construído, fazem parte do conjunto de variáveis que têm potencial para alterar as características do fundido e também da simulação. Faz-se necessária uma verificação dos chamados dados de entrada, pois, quanto mais próximos às condições de produção do fundido, maior será a acurácia dos resultados [28].

4.9.1 - O software MAGMA⁵.

O software MAGMA⁵ foi projetado com o objetivo de prever a qualidade total do processo de fundição utilizando a simulação do enchimento do molde e os fenômenos associados, do processo de resfriamento e solidificação e, como opção, as tensões e deformações induzidas ao metal solidificado, a formação microestrutural e distribuições de propriedades mecânicas e metalográficas [29,5].

Com o seu design modular, o software MAGMA⁵ contribui com a melhoria do processo de fundição, em toda extensão da cadeia de processo, desde o projeto até o acabamento final, concepção de protótipo e de ferramental definitivo, fluxo para otimização do processo, confiabilidade e qualidade. A questão da qualidade relacionada à indústria de fundidos, atualmente pode ser definida por inúmeras exigências que variam de acordo com cliente e são afetadas pelas variáveis de processo de fundição. Assim sendo, o MAGMA⁵ é projetado de forma a dar suporte às etapas de fabricação de fundidos, como projeto, propriedades de fabricação de moldes, fusão e metalurgia, estruturas e resultados finais [29,5].

O MAGMA⁵ tem aplicabilidade em todos os materiais fundidos, e há histórico de utilização em simulações envolvendo ferro fundido nodular, cinzento, alumínio fundido, variadas peças de aço, com moldes em areia, coquilhas, entre outras utilizações. O software MAGMA⁵ utilizado em fundição, desenvolve uma série de benefícios como:

- reduzir os custos da não qualidade, atenuando a probabilidade de desenvolvimento de defeitos de fundição, melhorando as condições do fluxo metálico, minimizando a turbulência, reduzindo assim a formação de óxidos, escória de arrastamento e porosidades originadas nos gases absorvidos;
- reduzir o consumo de material, reduzindo o percentual desperdiçado, melhorando a produtividade, reduzindo os custos relacionados à energia consumida;
- otimizar os ciclos de produção, reduzindo os custos através da otimização do processo;
- prever as janelas de produção com maior robustez;
- reduzir ruídos da comunicação interna, elevando também estes benefícios aos seus clientes externos;
- aumentar a confiabilidade dos fundidos produzidos utilizando uma ferramenta inovadora de forma pró-ativa;
- criar uma base de dados que auxilie a tomada de decisões acertadas, fornecendo transparência e distinção entre causa e efeito;
- aumentar a receita e os lucros, reduzindo e/ou eliminando os custos da baixa qualidade em toda a cadeia produtiva;
- fornecer uma base confiável, que garanta a qualidade total dos produtos, que os agregue valor, e os diferencie competitivamente no mercado;
- apoiar o desenvolvimento de estratégias de definição de preços baseada em qualidade e valor agregado, conseguido com a utilização de novas tecnologias.

O software MAGMA⁵ possibilita a previsão, de forma bastante confiável, das particularidades dos fundidos, para cada sistema de alimentação definido e para cada ajuste de parâmetros do processo [29,5].

O uso do MAGMA⁵ no processo de fundição, simboliza o implemento de tecnologias inovadoras, e é considerado um sinal de ascensão da competência técnica da fundição, a preocupação com todas as fases de produção e um forte foco

no cliente, atendendo de maneira mais rápida e confiável aos requisitos específicos de cada cliente [29,5].

4.10 - O Processo Shell Molding

O processo de produção de fundidos que utiliza “cascas” para a obtenção das peças, que originalmente nasceu na Alemanha onde fora denominado "Processo Cronin" ou “Processo C”; desenvolvido durante a 2ª guerra mundial e colocado em utilização por volta de 1940 e patenteado por Johannes Cronin em 1944, popularmente conhecido nos dias de hoje como "Shell Molding", nome de referência utilizado nos EUA [30,21].

Este processo utiliza uma mistura de areia aglomerada com resina sintética polimerizável a quente (termosetting), para confecção de moldes denominados cascas. Sendo caracterizado principalmente por paredes finas e uniformes, este processo possibilita a reprodução de modelos com perfis e arestas bem definidas [30,21].

As cascas são formadas a partir da deposição da areia coberta com resina sobre placas aquecidas. As areias empregadas neste processo devem ser finas e isentas de impurezas, as mais empregadas são as areias de sílica. As resinas comumente utilizadas na mistura são do tipo fenólico, empregadas em percentuais de 2 a 8% sobre o volume de areia e homogeneizadas em misturadores de pás ou mós. As misturas de areia e resinas que compõem as “areias shell”, são normalmente fornecidas aos usuários preparadas, ficando sua composição a cargo do fornecedor, podendo este realizar alterações e ajustes para desenvolvimento de propriedades da mistura, atendendo especificamente ao que se destina, ou conforme a solicitação do cliente. Desta forma, é possível minimizar possíveis problemas como a geração de gases, colapsibilidade, entre outros originários da areia, garantir a qualidade e uniformidade, desenvolvendo as características particulares para o processo, contribuindo para a qualidade do mesmo e possivelmente reduzindo os custos [30,21].

A figura 17 apresenta um ferramental utilizado para confecção das cascas.

Figura 17. Ferramental utilizado no processo Shell, montado na máquina
Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals



Os ferramentais utilizados neste processo (modelos, placas), são confeccionados em metal ou ligas metálicas, aço e/ou ferro fundido. São compostos de placa base, modelos, sistemas de alimentação e enchimento, pinos extratores e placa extratora.

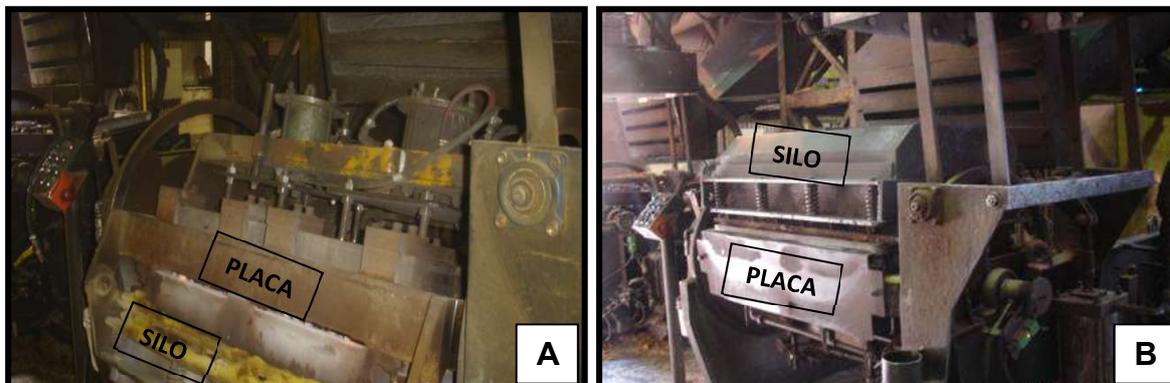
A placa modelo apresentada na figura 17, é aquecida em sua parte inferior, por um sistema composto por uma rede de distribuição de gás e de bicos queimadores, posicionados de modo a desenvolver um aquecimento homogêneo do conjunto. Há ainda a aplicação de uma fina camada de silicone sobre o modelo, que funciona como um separador, evitando a aderência de areia e auxiliará na extração das cascas [30,21].

Após aquecimento e preparação da superfície da placa, o processo seguinte é a deposição a areia shell sobre a placa modelo.

Este processo é obtido através do giro da placa, posicionando-a sobre o silo onde contem a areia preparada, conforme mostrado esquematicamente na figura 18-A.

Na etapa seguinte, todo o conjunto gira e o silo contendo a areia, é posicionado sobre a placa modelo, conforme mostrado esquematicamente na figura 18-B. Desta forma, a areia é depositada sobre a placa modelo, iniciando a formação de uma “casca” de areia.

Figura 18. Posição do conjunto de confecção de cascas com os giros da máquina:
A-primeiro giro-posicionamento da placa modelo; B-segundo giro-deposição
da areia para confecção da casca shell.
Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals



Com a mistura de areia Shell ativada termicamente, a espessura da casca é determinada pelo chamado tempo de investimento, definido como o tempo em que a areia ficará em contato direto com o ferramental aquecido. Este conjunto, placa modelo e temperatura alta, tão logo tenham determinado as características dimensionais da casca, retornará à posição inicial e a areia que não se aglomerou retorna ao silo e será utilizada na confecção de uma próxima casca [30,21].

Após o retorno à posição inicial as cascas formadas, conforme apresentadas esquematicamente na figura 19, já contemplam suas geometrias e seu dimensional característico, embora apresentem-se, ainda, parcialmente curadas.

Figura 19. Casca shell já com a espessura definida
Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals



Para que as cascas estejam preparadas para a etapa posterior é necessário realizar a cura completa das mesmas, visto que a parte que não teve contato direto com a placa aquecida necessita de temperatura para completar o processo de cura. Esta etapa é realizada com uma fonte calor sobre a casca através de um forno ou estufa, com temperaturas entre 280° a 350° (figura 20) [30,21].

Figura 20. Cura externa da casca com o forno
Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals



Após curada a parte externa da casca a mesma é extraída com auxílio dos pinos extratores. Neste estágio, as cascas encontram-se prontas, porém com a alta temperatura induzida pelo processo, a mesma apresenta maleabilidade nos pontos onde ocorreram maior aporte de energia térmica ou heterogeneidade da mistura. Para que não ocorra problemas de empenamento das mesmas, gerando a necessidades de posterior acabamento, as cascas são depositadas sobre mesas desempenadeiras, conforme representação esquemática da figura 21.

Figura 21. Processo de desempeno das cascas
Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals

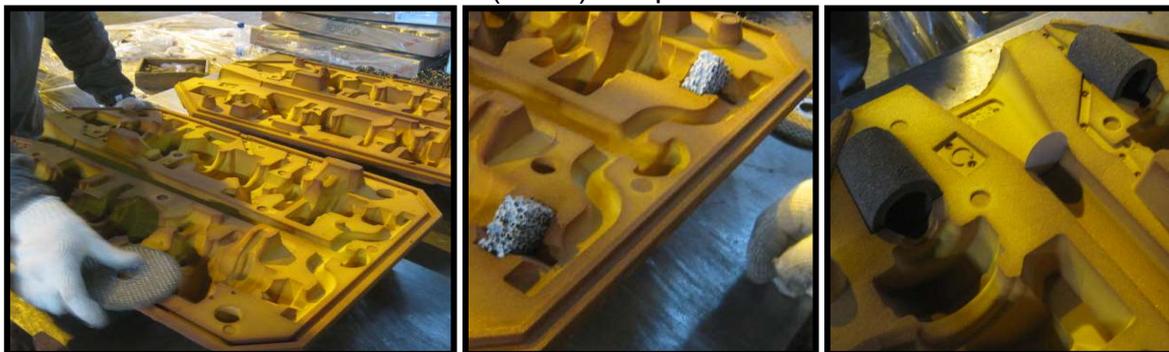


Esta operação é necessária para garantir um bom nível de planicidade das cascas e conseqüentemente um bom fechamento, desta forma, reduzindo a possibilidade de formação de rebarbas na linha de separação [30,21].

Após desempenadas as cascas seguem para o processo de fechamento onde inicialmente são acabadas, retiradas aderências de areia, rebarbas, marcas, ressaltos e qualquer imperfeições que possam gerar falhas no fechamento ou retrabalhos posteriores. Também nesta etapa, são adicionados os insumos que farão parte dos sistemas de enchimento (filtros) e alimentação (luvas) das peças, conforme apresentados na figura 22 [21].

Figura 22. Acabamentos das cascas e colocação de filtros e luvas

Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals



Ainda na etapa de fechamento, as cascas as mesmas são grampeadas de modo a permanecerem fechadas até serem posicionadas nas caixas de moldagem conforme apresentadas na figura 23. Esta operação é de extrema importância caso ocorra a formação de um estoque de cascas após a etapa de fechamento das mesmas.

Figura 23. Cascas fechadas com grampos e posicionadas nas caixa de moldagem

Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals



O processo de moldagem Shell, apresenta algumas diferenças dos demais processos de fundição que utilizam moldes em areia. Como características principais há o posicionamento das cascas dentro das caixas e moldagem (figura 24) e o preenchimento dos espaços restantes com granalhas de aço. O conjunto é apoiado sobre uma mesa vibratória onde é feita a compactação do molde, o que garantirá suporte à pressão metalostática (abertura do molde). Então o molde segue da linha de moldagem para a linha de vazamento (figura 24) [30,21].

Figura 24. Enchimento da caixa de moldagem com granalhas de aço, compactação do conjunto moldado e vazamento (enchimento do molde)

Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals



Na figura 25 é demonstrado que após o vazamento das peças, estas seguem resfriando até chegarem à estação de desmoldagem, local onde as peças são extraídas das caixas de moldagem, as granalhas retornam para o processo e os resíduos de cascas e insumos são retirados do sistema [21].

Figura 25. Estação de desmoldagem

Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals



As peças seguem via linha aérea para o processo de acabamento que sequencialmente é composta das etapas de quebra de canais e massalotes, jateamento em jato de granalhas de aço conforme demonstrado pela figura 26, acabamento com disco abrasivo, retirada das rebarbas da apartação em uma prensa, acabamento fino em possíveis veiaamentos, aderências de areia ou outras irregularidades conforme representação esquemática da figura 27, inspeção de sanidade externa visual e interna por ultra som representadas na figura 28, oleagem e embalagem das peças fundidas, representadas na figura 29 [21].

Figura 26. Estação de quebra de canais, massalotes e de jateamento (jato de granalhas)

Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals



Figura 27. Linha de acabamento das peças

Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals



Figura 28. Linha de inspeções finais
Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals



Figura 29. Tanque de oleagem e estação de embalagem das peças
Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals



Após embaladas, as peças são dispostas para envio ao cliente, conforme a programação de entregas.

O processo descrito acima é utilizado exclusivamente para produção de virabrequins, que variam de 8,80 kg a 20,00 kg e grandes produções mensais de até 40000 peças por cliente. Estas são algumas das características do processo utilizado para desenvolvimento deste projeto que, tem ainda outras necessidades como um efetivo controle de processo quanto à temperatura de trabalho, pois pode ocorrer o início da reação da areia shell, endurecendo-a ainda no silo. Ainda relacionado à areia shell, almejando um acabamento superficial excelente, é possível utilizar areia bem finas e, como característica do processo, é possível evitar potenciais problemas referentes à permeabilidade da casca com a queima da resina durante o vazamento.

A utilização de areias mais finas, induz ao aumento do consumo de resina, o que induz a uma maior resistência mecânica da casca com a inconveniente maior geração de gases, oriundos da queima da resina durante o vazamento e, como consequência, a possibilidade do aparecimento de porosidades superficiais no fundido [21].

O processo Shell, assim como os demais processos de fundição, apresenta algumas vantagens e algumas desvantagens, as quais, algumas são apresentadas a seguir.

4.10.1 Vantagens do Processo “Shell Molding”

O processo Shell Molding apresenta uma série de vantagens das quais podemos destacar:

- este processo possibilita a produção de moldes em um curto espaço de tempo garantindo velocidade ao mesmo e sem a necessidade de mão de obra especializada;
- confere alta precisão, possibilitando a utilização de reduzidas tolerâncias dimensionais, resultando em excelente estabilidade dimensional, redução do sobremetal e do tempo de usinagem das peças provenientes deste processo;
- moldagens que utilizam baixos volumes de areia e geram moldes relativamente leves, de fácil transporte e com uma menor relação areia/metal;
- ótima reprodutibilidade de seções finas e de detalhes geometricamente complexos, tendo como resultado, fundidos com acabamento superficial excelentes;
- necessidade de menores espaços físicos para a fabricação e para armazenamento dos respectivos moldes;
- maior dinâmica e menores custos referentes aos processos de acabamento das peças fundidas;
- alta produtividade, principalmente quanto à produção seriada de peças;
- adaptação à produção de peças complexas;
- possibilita a estocagem de moldes por período de tempo relativamente grande;
- possibilidade de automatização do processo até um grau bastante elevado.

- elevada permeabilidade de machos e moldes, mesmo com a utilização de areia fina.
- vida de banca elevada;
- reduzido índice de refugos originados na umidade, inclusões de areia e sinterizações [30,21].

4.10.2 Desvantagens do Processo “Shell Molding”

Assim como as vantagens apresentadas, o processo Shell Molding apresenta também, desvantagens comparado à outros processos de fundição, das quais podemos destacar:

- pesos e dimensões reduzidas das peças a serem fundidas, normalmente não ultrapassam os 20 kg, devido às pressões suportadas e resistência mecânica das cascas;
- alto custo inicial dos ferramentais, apesar de uma maior vida útil, pois o processo de confecção e os materiais utilizados são onerosos;
- alto custo areias cobertas com resinas, comparadas às areias a verde.
- alto custo envolvido na regeneração da areia;
- baixa flexibilidade quanto aos sistemas de enchimento e alimentação;
- necessidade de maiores controles de processo;
- processo oneroso para fundidos em pequena escala [30,21].

As peças oriundas do processo Shell Molding, a exemplo das peças advindas dos demais processos de fundição com moldes em areia, apresentam defeitos característicos como a carbonetação, atribuída à decomposição da resina pela queima, formando um filme de carbono ou grafite que se depositam nas superfícies do metal líquido ou dos grãos de areia, durante o enchimento do molde.

Outro defeito é a deposição de pequenas inclusões não metálicas e pequenas porosidades de gás sobre a superfície, causados pela utilização de resina fenólica, pois há uma reação do metal líquido com o oxigênio presente em sua composição, formando inclusões não metálicas e cavidades de gases, que podem ser resultantes da reação com o oxigênio e também com o hidrogênio atmosférico [30,21].

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada, inicialmente, uma análise sobre a qualidade do produto, defeitos associados e o impacto destes, na produção de virabrequins. Diante das informações levantadas, foram estudadas junto ao pessoal de produção, engenharia, qualidade e fornecedores de insumos e serviços algumas possibilidades de melhoria que pudessem ser aplicadas ao processo de produção do virabrequim. Dentre algumas propostas, o estudo de melhoria do sistema de alimentação, mostrou-se promissor pois envolveria simulação computacional utilizando o software MAGMA⁵, o aprofundamento do conhecimento sobre luvas isolantes e exotérmicas assim como o desenvolvimento de um trabalho em conjunto com os fornecedores contanto os devidos suportes técnicos que, nos dias atuais se tornam cada vez mais comuns nas grandes empresas.

O insumo de fundição apresentado neste trabalho, assim como o projeto de coleta de dados do processo Shell Molding utilizado na empresa BR METALS, envolveu também os processamentos, análises e discussões entre os departamentos de engenharia de produto, processo e qualidade da empresa. As informações obtidas foram posteriormente levadas a um fórum de discussão, com o intuito de verificar as interfaces e as oportunidades de melhorias a serem, possivelmente aplicadas ao projeto, junto aos especialistas da empresa FOSECO S.A., que fabrica e fornece insumos de fundição e especialistas em simulação de processos da empresa MAGMA⁵.

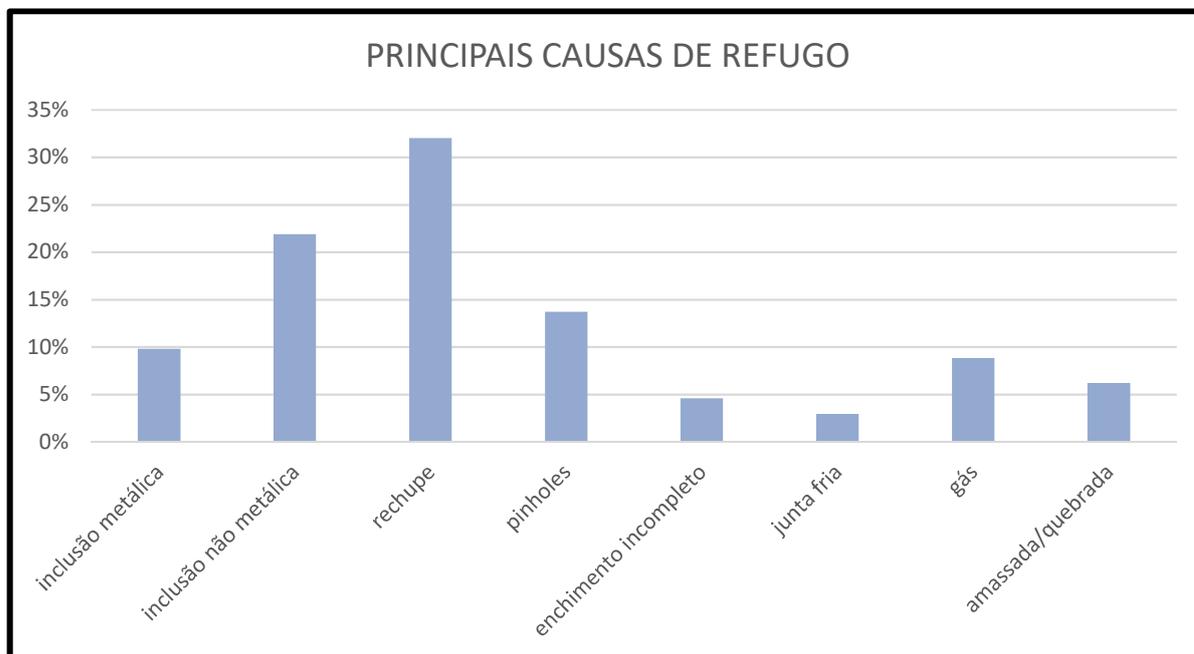
5.1 – Aferição dos dados do processo

Os dados levantados do processo indicaram possibilidades de trabalho em várias frentes, como mostra o gráfico da figura 30.

A partir do levantamento realizado, foram realizados estudos rápidos pela equipe, avaliando as causas, efeitos e possíveis soluções para os problemas encontrados, através de dados sistêmicos da empresa, consolidados pela engenharia da qualidade.

Figura 30. Principais causas de refugo, no processo shell 2 no período de janeiro a junho 2015.

Fonte: (Autor)/arquivo BR Metals



Estes estudos apontaram que algumas ações internas como por exemplo, uma auditoria de processo, poderiam auxiliar na redução dos refugos gerados por falhas nas etapas do processo. Mostraram também que o aprofundamento no estudo dos rechupes, poderiam induzir a ganhos diretos e também a informações valiosas para aplicação na cadeia de produção de virabrequins e também a outros tipos de processos e outros tipos de peças.

5.2 - Ajustes dos parâmetros de simulação (set up do software)

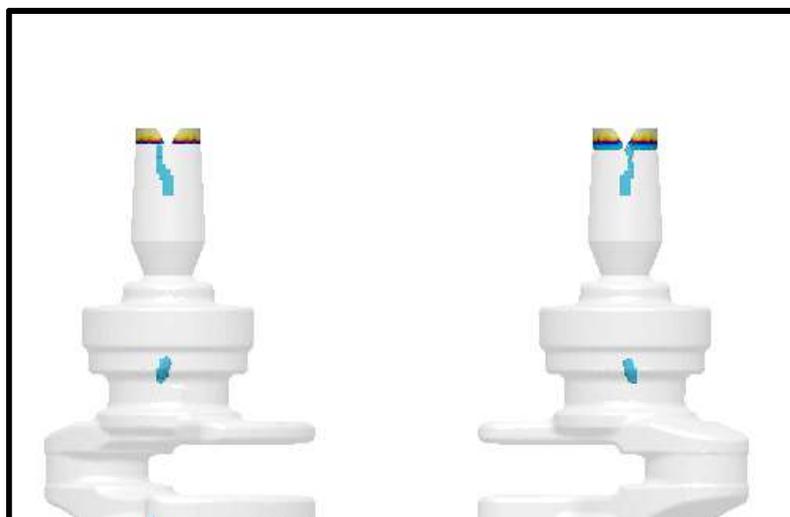
Em uma primeira etapa foi definido que as condições iniciais de simulação seguiriam os parâmetros de processo estimado pelo próprio software, para a avaliação dos resultados, posteriormente ajustando com o processo real. Foram realizadas quatro simulações baseadas nas estimativas do banco de dados do software, para os ajustes necessários. As simulações tiveram como objetivos a análise do perfil de solidificação, o número de nódulos, a matriz formada, a formação de pontos quentes isolados e consequentemente os potenciais defeitos gerados.

A peça estudada neste trabalho foi definida em função de sua complexidade, do critério de aceitação do fundido exigido pelo cliente e pela redução do número de peças segregadas por rechupe no processo Shell Molding, diminuindo assim alguns custos de produção.

Partindo de uma avaliação inicial do processo, foi definido uma releitura do mesmo no software de simulação numérica MAGMA⁵, utilizando as variáveis levantadas em conjunto com o suporte MAGMA no Brasil e o fornecedor de insumos de fundição FOSECO, para garantir a melhoria, prover a estabilidade do processo a fim de garantir peças fundidas, dentro do nível de qualidade exigido pelo cliente.

A principal melhoria proposta e almejada neste trabalho, se referiu à redução dos virabrequins reprovados na linha de produção por apresentarem porosidades internas, caracterizadas como rechupe. A região estudada é a próxima a região do volante, mostrada na figura 31, que se trata de uma região crítica definida pelo cliente, devido aos furos de lubrificação, e pelo fornecedor, por se tratar de uma região posicionada abaixo dos massalotes. Porém, segundo o pessoal de apoio técnico, e dos parceiros neste trabalho, os esforços para a redução do tipo e da posição destes rechupes gera uma distribuição de energia que, com a ajuda da gravidade fornecem um maior equilíbrio das pressões internas e também do gradiente térmico, estendendo a probabilidade de redução de problemas microestruturais e melhorando a sanidade interna, à toda a geometria das peças.

Figura 31. Região de estudo de redução de porosidades por rechupe
Fonte: (Autor)/arquivo BR Metals



Foram realizadas simulações para as amostras fundidas visando o ajuste do software, utilizando o mesmo metal, as mesmas condições dos processos de confecção de cascas, na moldagem, no vazamento, no resfriamento e na desmoldagem das peças, quanto a materiais, equipamentos e mão de obra.

As amostras fundidas foram analisadas e comparadas com os resultados apontados pela simulação. Uma vez ajustados as condições de entrada de dados, estes valores foram definidos como o padrão de simulação para utilização com as novas luvas apresentadas neste trabalho.

5.3 – Simulação do sistema de alimentação

Definidas as entradas do software MAGMA⁵, foram realizadas as simulações do sistema de alimentação com as luvas de uso corrente no processo e as luvas propostas, para comparação com as variáveis de saída do software, correlacionando-as com os resultados encontrados, visando a compreensão do mecanismo de formação do rechupe. Assim, foram avaliadas as variáveis que apresentaram potencial para a formação de rechupes, sendo elas, as regiões que apresentaram pontos quentes isolados e porosidades. Uma observação destas duas variáveis pondera o princípio de formação de pontos quentes isolados que induz à formação de porosidades microestruturais.

5.4 – Avaliação das propriedades mecânicas e microestruturais

Utilizando microscópio ótico, máquina universal de ensaios e durômetros, foram também avaliadas as propriedades mecânicas e microestruturais, pois, tratam-se de requisitos do cliente e, assim sendo, devem permanecer dentro dos padrões de qualidade, exigidos pelo mesmo.

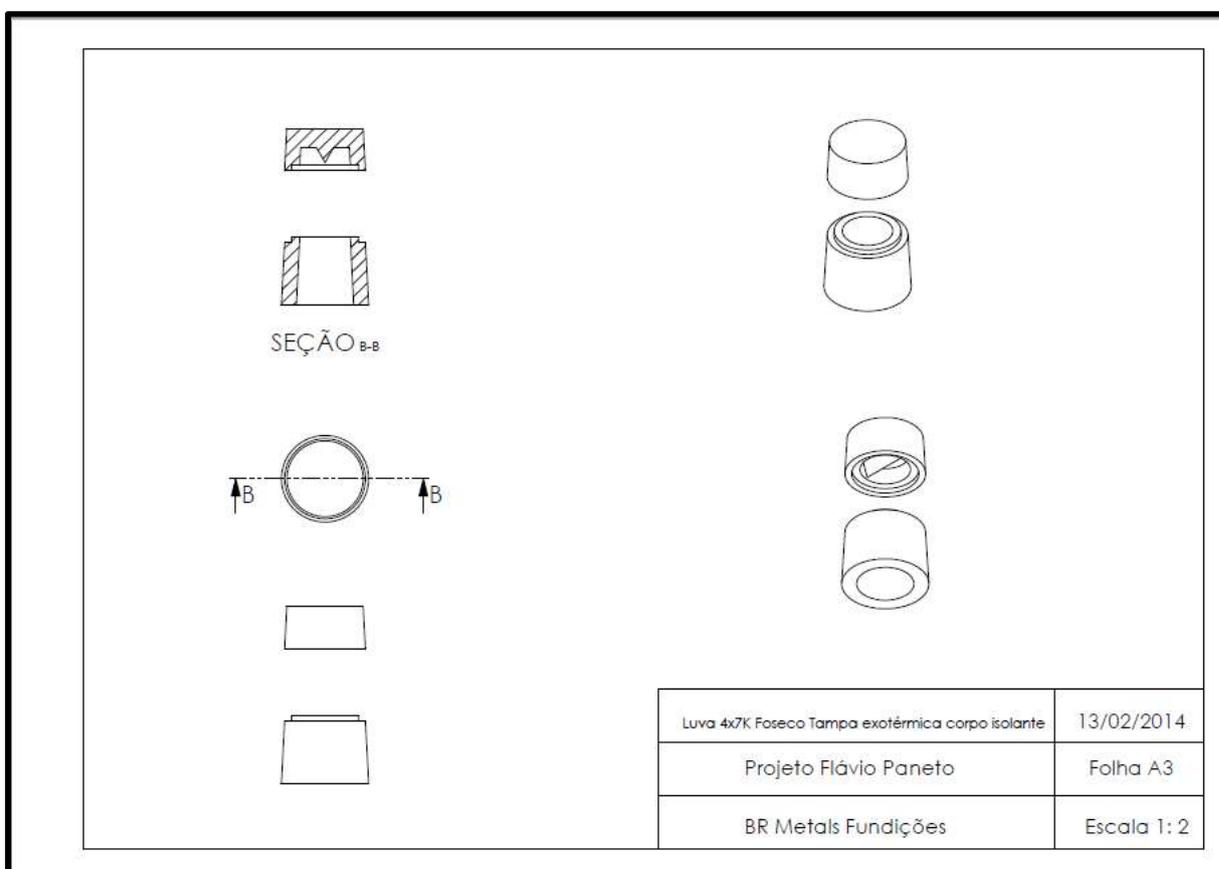
Os resultados de composição química não foram considerados como diferenciais, visto que foi utilizado o mesmo metal base. As condições microestruturais encontradas na peça de amostra da produção e reproduzida na simulação,

forneceram as informações básicas e alguns dos parâmetros de confecção das luvas isolantes e exotérmicas.

5.5 – Confecção das luvas isolantes/exotérmicas

Esta etapa envolveu um estudo direcionado e um contato mais próximo com os fabricantes de luvas. A figura 32 exhibe o desenho básico, preliminar para a confecção da luva em questão, onde o corpo deveria ser composto de material isolante e o tampo de material exotérmico.

Figura 32. Desenho básico para construção da luva
Fonte: (Autor)/arquivo BR Metals

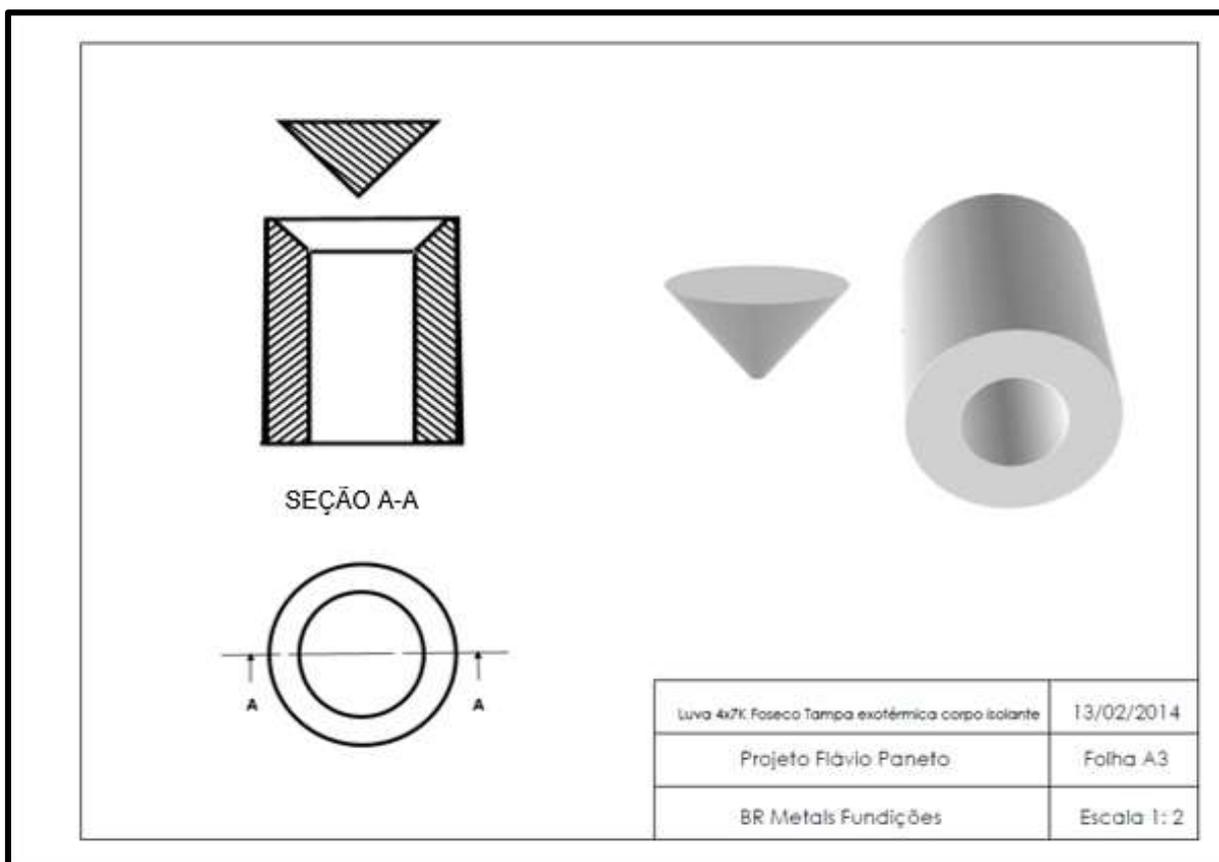


Para a confecção das amostras foram necessárias algumas definições e premissas. A construção do ferramental para produção de uma luva é uma das etapas

que consomem maiores tempos e custos. A aplicação desta etapa a um produto que está em desenvolvimento, que não tem resultados consolidados e que seria destinado a uma utilização exclusiva, pelo menos em um primeiro momento, envolveria custos que, nesta fase não estavam no escopo do fornecedor e tampouco da empresa, indicando que uma opção à construção das luvas deveria ser discutida.

A opção encontrada e oferecida pelo fornecedor foi a adaptação do ferramental existente, produção de algumas amostras, testes e a avaliação dos resultados e, caso os resultados práticos se mostrassem promissores como a simulação, tomariam para si a responsabilidade de desenvolver um ferramental de produção que atendesse à necessidade, visto que a adaptação proposta limitaria a produção de luvas em grande escala. O perfil aproximado conseguido pelo fornecedor está representado na figura 33.

Figura 33. Perfil de construção das luvas isolantes e exotérmicas
Fonte: (autor)



A confecção das luvas partiu do cálculo base, padrão comercial dos componentes utilizados para luvas isolantes e exotérmicas, pesagem dos mesmos e logo após, levado a um misturador tipo bateadeira para homogeneização da mistura da massa refratária que foi usada para confecção.

As figuras 34 e 35, ilustram as operações realizadas no laboratório do fornecedor de luvas FOSECO, com um misturador “Amadio”, seguindo os procedimentos de segurança, utilizando equipamentos adequados e com acompanhamento e supervisão técnica especializada.

Figura 34. Equipamento utilizado para homogeneização da mistura
Fonte: (Autor)



Figura 35. Mistura preparada para moldagem
Fonte: (Autor)



Após preparação das misturas das massas, as luvas foram moldadas, o corpo confeccionado com material isolante, sendo conformado utilizando o molde de produção, com uma pequena adaptação para encaixe do tampo de material exotérmico. A figura 36 apresenta o aspecto do corpo da luva após extração do molde.

Figura 36. Corpo da luva após moldagem com material isolante
Fonte: (Autor)



O tampo, confeccionado com a mistura para luvas exotérmicas, foi moldado em um protótipo de molde, construído em polímero e compactado à mão, conforme apresentado na figura 37.

Figura 37. Moldagem do tampo exotérmico
Fonte: (Autor)



Finalizadas estas operações e, com os corpos e tampos preparados nas dimensões e materiais propostos, os mesmos foram então enviados e tratados na estufa, com uma temperatura controlada ($100\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 80 minutos) pois apresentavam teores residuais de umidade e para completarem a cura das misturas, conforme mostrado na figura 38.

Figura 38. Operações de retirada de umidade e cura da luva
Fonte: (Autor)



Finalizada a etapa de secagem e cura, as luvas foram montadas, ainda no laboratório do fornecedor FOSECO, conforme apresentado na figura 39.

Figura 39. Luva exotérmica e isolante
Fonte: (Autor)



5.6 – Fundição das amostras com as luvas isolantes/exotérmicas

O processo de confecção das amostras utilizando as luvas foi programado e executado seguindo os procedimentos internos de desenvolvimento da empresa BR Metals, que são baseados nos padrões internacionais de desenvolvimento de produtos e processos (APQP).

O processo de desenvolvimento das amostras foi monitorado desde os testes preliminares, evitando assim os riscos de contaminação ou mistura com as peças de produção normal, gerando relatórios para as devidas avaliações de acordo com os pré-requisitos definidos, durante os processos de confecção e ensaios das amostras, conforme apresentado na figura 40.

Figura 40. Requisitos básicos para confecção e ensaios das amostras
Fonte: (Autor)

Especificador :	Material Cliente: TL 020
RT: 650 N/mm ²	Experiência Nº: 2
LE: 380 N/mm ²	Material Thyssen: FN38 FSN6
AL: 3 %	Nº Desenho: 07K.105.101 F
FERR.: 5 % 30 %	Modelos: 4
GRAF.: Tamanho: 58	CX. Machos:
Disposição:	Revisão: 01
Forma: VI	Processo: 3
PERL.: 70 % 95 %	Grupo: S2
HB: Min 215 Máx 270	
	Fundir 4 peças do TF 8478 para avaliação do comportamento da luva com corpo isolante e topo exotérmico do fornecedor FOSECO. Realizar ensaios: *Ultra som e Inspeção Visual (4peças); *Líquido penetrante (1 peça); *Material Completo(1 peça).
	Linha: 1 Coluna: 1

A fundição das amostras utilizou como base o processo de produção em uso na BR Metals para confecção de virabrequins, ou seja, foram confeccionadas cascas utilizando os parâmetros de produção. As cascas foram acabadas e preparadas para montagem dos insumos utilizados, só então foram separadas das demais pois, os insumos a serem utilizados nestas, mais precisamente as luvas, foram as luvas com o corpo em material isolante e o tampo exotérmico, conforme apresentado na figura 41.

Figura 41. Montagem da nova luva no molde
Fonte: (Autor)



Após a preparação dos moldes e moldagem, as amostras foram vazadas e seguiram para as linhas de resfriamento, quebra dos canais e dos massalotes, jateamento com granalhas de aço, acabamento final e inspeção, local onde as amostras foram separadas das demais peças e enviadas aos respectivos laboratórios para realização dos testes específicos, cujos resultados representam as condições específicas e os efeitos da utilização da nova luva.

A figura 42 representa a peça produzida, com o acabamento final para envio para etapa de aplicação da proteção superficial e posteriormente, embalagem.

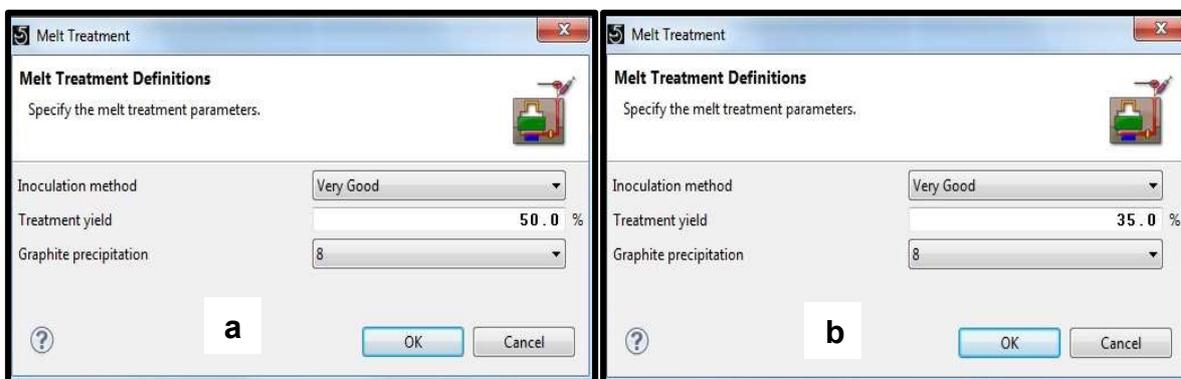
Figura 42. Peças produzidas utilizando as novas luvas
Fonte: (Autor)



6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Terminada a fase de ajuste de parâmetros da simulação, sendo fundidas três amostras e realizadas 3 simulações, ficou definido os parâmetros de processo faltantes, quais como apresentado na figura 43. O ajuste fundamental, descritos nas figuras a e b, é principalmente quanto ao tratamento do banho, que inicialmente foi definido como 50%(a), valor determinado pelo software em função do processo utilizado e, após a fundição e análise das amostras, este valor foi ajustado para 35%(b). Estes ajustes envolvem a correlação das características das amostras fundidas com as necessidades da simulação para um resultado bem próximo ao conseguido na prática. Segundo o especialista MAGMA, este ajuste deve-se ao princípio de que o processo de produção de virabrequins BR Metals, contempla a etapa de pós inoculação.

Figura 43. Definição dos parâmetros de simulação: (a)- definição inicial (b)- ajuste após fundição das amostras
Fonte: (autor)



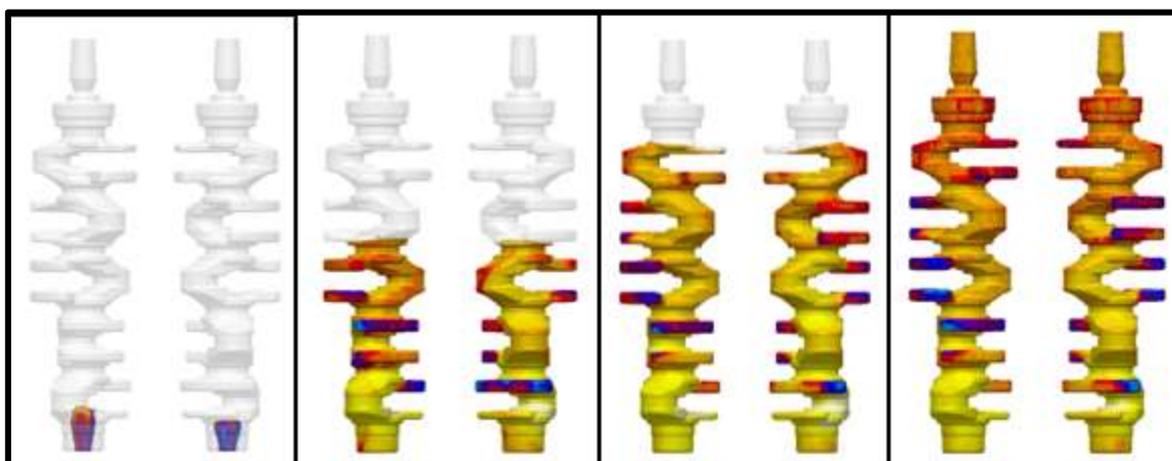
Quanto melhor definidas as variáveis e quanto maior o controle sobre as mesmas durante a manufatura, melhor será a qualidade do produto. Este domínio sobre as variáveis determinantes do processo é o grande responsável por um bom resultado da simulação, pois quanto melhor representadas as condições reais de produção em um estudo numérico, mais próximos do real serão os resultados obtidos, conforme observado por Carlos, Guesser e Baumer [28].

6.1 – Análise dos resultados da simulação das luvas

Após definidas as variáveis de entrada e os padrões de simulação, foram introduzidas no software as melhorias propostas relacionadas ao sistema de alimentação. A partir desta etapa do trabalho os estudos realizados contemplam a luva proposta.

Inicialmente foi avaliado o enchimento propriamente dito e, não foram evidenciados problemas quanto a este teste. Nota-se na figura 44 que não ocorreram discrepâncias entre uma cavidade e outra e o fluxo de metal proporciona uma subida gradual no interior do molde. Este comportamento indica uma menor possibilidade de geração de fluxo metálico turbulento, reduzindo a probabilidade de absorção de gases, o que pode ser considerado um potencial nucleador de rechupes e, a formação de óxidos, como apresentado por Fuoco e Corrêa [31] e por Niresh, Neelakrishnan, Arjun, Gowtham e Harish [32].

Figura 44. Simulação do enchimento das cavidades
Fonte: (Autor)

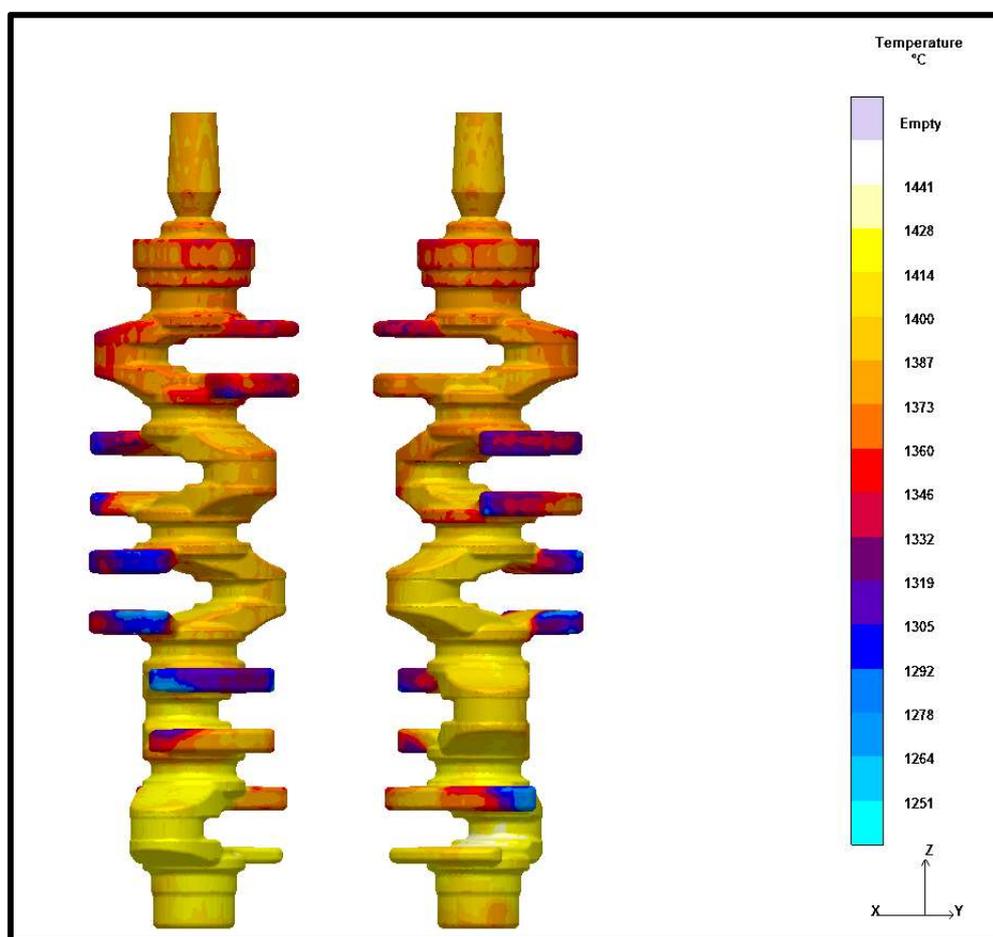


Uma avaliação térmica do conjunto se faz necessária, visto que as temperaturas apresentadas fornecem informações a respeito de como direcionar os artifícios de aumento da mesma à pontos específicos. A figura 45 apresenta o perfil de temperatura ao longo da peça.

Neste caso, onde o enchimento é realizado pela parte inferior do molde e o processo apresenta elevada taxa de extração de calor devido à moldagem com

granalhas de aço, é importante perceber que, o primeiro metal que entra no molde é o que percorrerá toda a extensão do mesmo e, assim, a probabilidade de que perca calor e que complete o enchimento da peça com uma temperatura mais baixa é muito grande. Ainda mais importante é o fato de que a luva está posicionada na parte mais alta do molde, aonde chegará o metal mais frio. É possível notar, observando a figura 45 que a temperatura exibe uma queda nas regiões próximas ao massalote, induzindo ao fundidor a necessidade de manter esta região aquecida, garantindo uma solidificação posterior à peça, justificando assim a colocação de uma luva.

Figura 45. Perfil de temperatura das peças, obtido na simulação
Fonte: (Autor)



Os resultados conseguidos na simulação representaram uma significativa melhora das condições das peças, comparando-os aos resultados auferidos na simulação das peças de produção. Esta comparação teve início com a composição química que, mesmo sendo a definida pelo processo e pelo cliente, para

efeito de resultados, é necessário que o efeito da manipulação da mesma durante a manufatura, esteja compreendida no intervalo definido, ou seja, as amostras produzidas necessitam de uma composição química final dentro dos valores especificados na simulação.

Esta análise segue recomendação do suporte MAGMA Brasil, visto que, para as propriedades do fundido, é comum que o resultado mandatório seja o atendimento às propriedades mecânicas e a composição química seja apenas um indicativo para obtenção das referidas propriedades, porém, para os resultados de simulação podem representar grandes diferenças dos resultados obtidos.

A tabela 1 apresenta os resultados da composição química obtidos pelo método de combustão para determinação do C e S e pelo método de espectrometria, para determinação dos demais constituintes da liga fundida e os resultados da simulação.

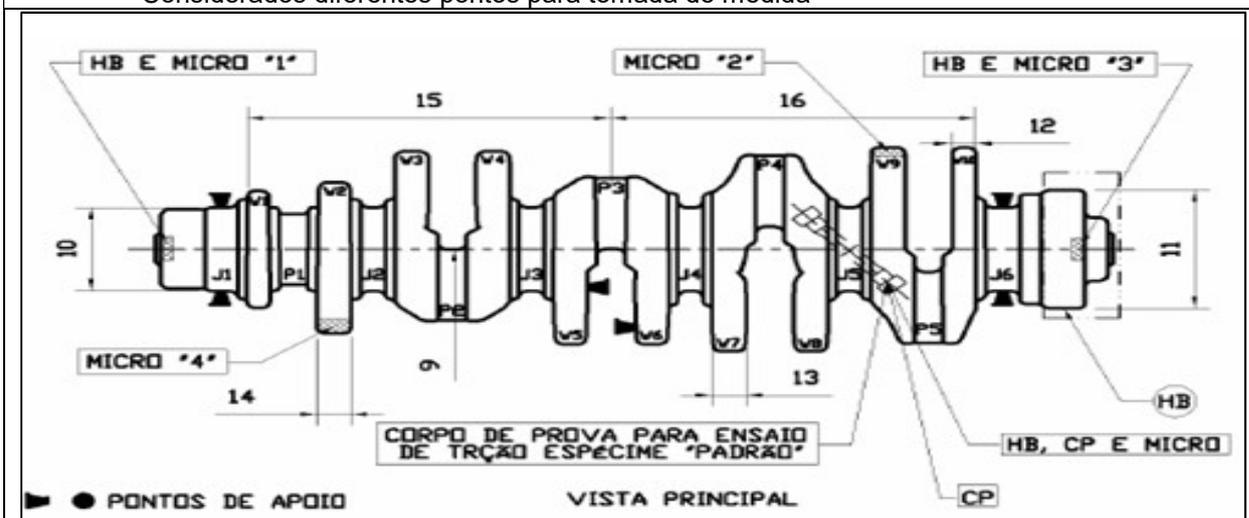
Tabela 1 – Comparativo dos valores especificados com os valores encontrados na amostra

Composição Química	C	Si	Mn	S	Cr	Cu	Mg	P	Sn	Zr	Ti	Al
Especificação do Cliente												
Mínimo	3,4	1,9	---	---	---	---	0,03	---	---	--	--	--
Máximo	4,0	2,7	0,8	0,02	0,1	1,0	---	0,1	0,1	--	--	--
Especificação Interna / Dados de entrada do software												
Mínimo	3,55	2	0,60	0,004	---	0,20	0,03	---	0,03	--	--	---
Máximo	3,70	2,25	0,65	0,014	0,04	0,30	0,05	0,04	0,04	--	--	---
Análise Química / Encontrada na Amostra												
Coquilha	3,7	2,2	0,6	0,009	0,02	0,22	0,04	0,03	0,03	--	--	---

Após os ensaios laboratoriais para avaliação da composição química, as propriedades mecânicas foram os pontos agora analisados. De acordo com a tabela 2, os resultados sugeriram similaridade entre as peças e/ou resultados ligeiramente superiores nas peças simuladas com as luvas de produção em relação às simuladas com as luvas novas, com exceção dos valores de alongamento que, podem estar associados a uma maior homogeneização microestrutural, balanceamento das propriedades de dureza, resistência à tração e limite de escoamento, causando assim, o conseqüente aumento do alongamento.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas obtidas na amostra

Propriedades Mecânicas	Dureza Brinell		Resistência à tração (N/mm ²)		Limite de escoamento (N/mm ²)		Alongamento (%)	
Especificação do Cliente / Dados de entrada do software								
	215 a 270		≥ 650		≥ 380		≥ 3 %	
Valores Encontrados na simulação								
	prod.	nova	prod.	nova	prod.	nova	prod.	nova
Micro 1	249	239	---	---	---	---	---	---
Micro 2	243	242	---	---	---	---	---	---
Micro 3	244	244	---	---	---	---	---	---
Micro 4	233	233	---	---	---	---	---	---
*CP – mínimo	---	---	638	631	396	392	2,7	2,8
*CP – médio	---	---	724	716	457	453	5,9	6,1
*CP – máximo	---	---	797	788	520	515	9,1	9,4
Valores encontrados na amostra								
Micro	252 / 242		763		429		5,8	
*- Considerados diferentes pontos para tomada de medida								



Terminadas as análises da composição química e das propriedades mecânicas e, comparadas às luvas de uso corrente no processo e as luvas propostas, as amostras foram direcionadas às análises de possíveis defeitos estruturais.

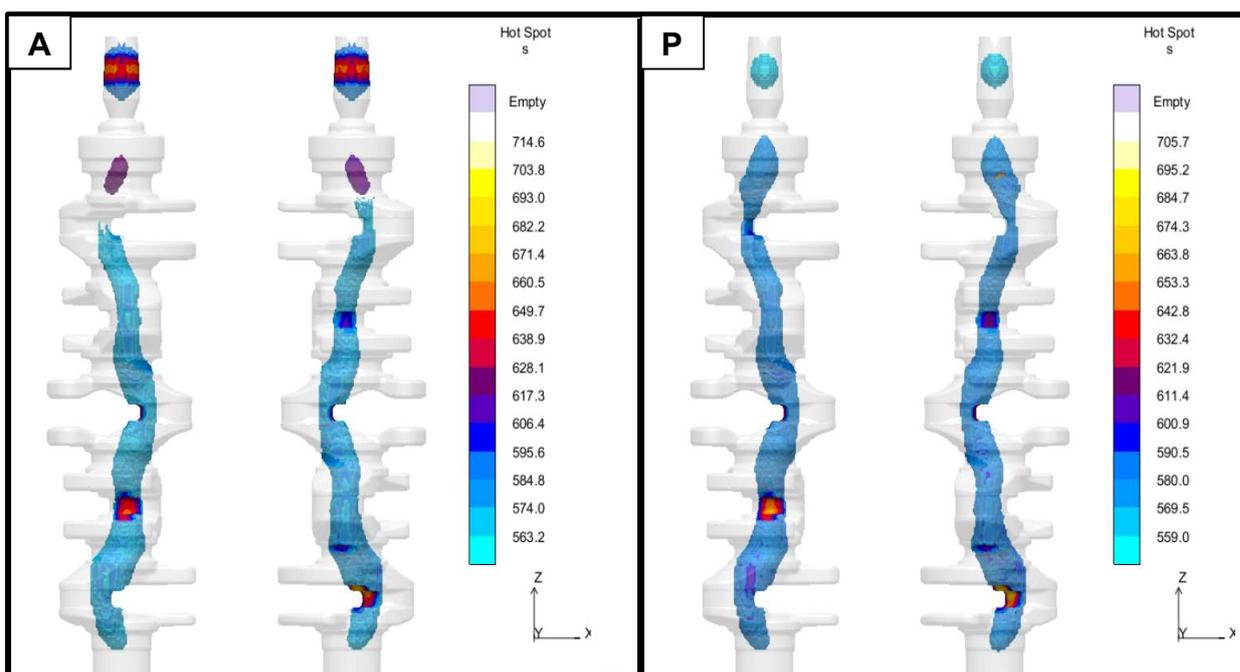
Nesta etapa do trabalho, o resultado mais importante analisado foi representado por uma das variáveis de saída do software que define os pontos quentes resultantes.

Esta variável se relaciona diretamente com o princípio de formação do rechupe, originado no último metal a solidificar-se, ou seja, no último ponto quente isolado na microestrutura.

Em uma análise à figura 46, é possível notar que no processo atual (A) há uma indicação de ponto quente isolado, enquanto o proposto apresenta uma estrutura de solidificação onde o último metal quente não se aprisionou em pontos

isolados. Esta variável analisada isoladamente mostra uma tendência, porém foram avaliadas outras variáveis que complementam os resultados obtidos nesta primeira análise.

Figura 46. Pontos quentes resultantes na microestrutura (A) processo atual
(P) processo proposto
Fonte: (Autor) / arquivo BR Metals



Seguindo a estrutura analítica proposta foi avaliada a segunda variável que relaciona-se à probabilidade das regiões apresentarem porosidade. Uma observação destas duas variáveis pondera se o princípio de formação de pontos quentes isolados induz à formação de porosidades microestruturais.

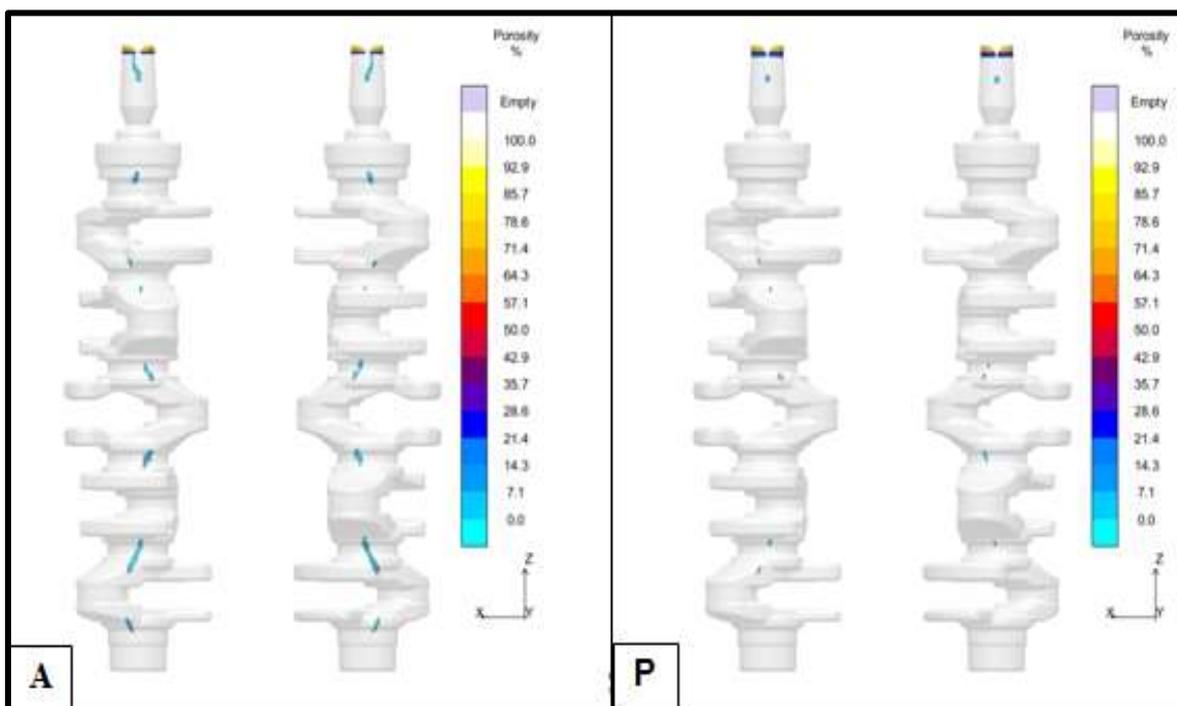
Analisando a figura 47 pode ser observado que o resultado apontado pela simulação numérica e também indicado pela análise dos pontos quentes, sugere a probabilidade de formação níveis de porosidade mais altos no processo atual (A) que no processo proposto.

Esta variável de saída do software avalia a probabilidade de formação de porosidades. O resultado por ela representado não significa uma reprovação do produto. Mais preciso será o resultado quanto maior a proximidade dos dados da simulação com os dados reais do processo. Esta ferramenta apresenta a tendência ao aparecimento de porosidades das regiões que contenham os últimos metais

líquidos remanescentes e qualquer descontrole das variáveis de produção, levará esta tendência a um resultado real.

Figura 47. Resultados da simulação quanto à porosidade, (A) sistema atual e (P) sistema proposto

Fonte: (Autor)/arquivo BR Metals

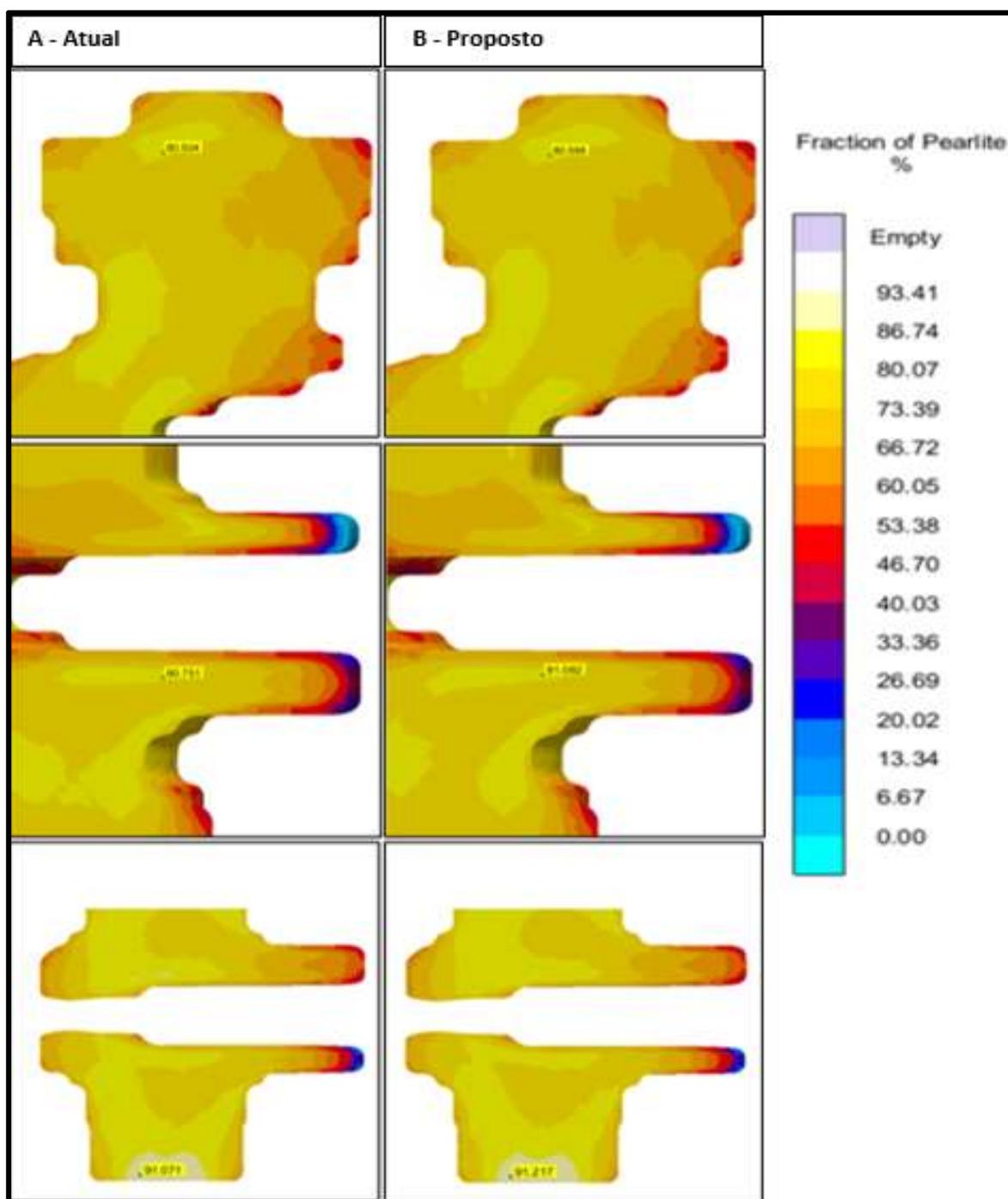


Apesar de o trabalho proposto apresentar indícios da possibilidade de redução dos rejeitos por porosidades originadas em rechupes, logo nas primeiras variáveis avaliadas, se faz necessário um estudo abrangente, com produção e análise de amostras, que envolva propriedades mecânicas e metalúrgicas resultantes, avaliadas comparativamente às obtidas nas peças de produção, que atendem aos requisitos e exigências do cliente.

Ainda que não seja o objetivo primário, mas por ser um trabalho que propõe a redução dos níveis de refugo como premissa, as peças produzidas utilizando a citada técnica, devem no mínimo, manter os níveis atuais quanto a propriedades microestruturais e, conseqüentemente só se justifica sua incorporação ao processo de produção se as propriedades mecânicas resultantes, também se mantiverem nos mesmos níveis desenvolvidos no atual processo.

Adotando esta premissa, foram também analisadas as propriedades microestruturais, comparando-as nos dois processos. A figura 48 apresenta os percentuais de perlita obtidos nas simulações do processo atual, variando entre 74 e 91% e do proposto, variando entre 73 e 91%, visto se tratar de uma das características microestruturais exigidas pelo cliente.

Figura 48. Percentual de perlita em diferentes pontos da peça
Fonte: (Autor)/arquivo BR Metals



Esta fase tem grande influência no limite de resistência da liga e suas variações são determinantes para as propriedades mecânicas. A sua presença e os níveis obtidos, dependem de outras variáveis, como por exemplo, a composição química, a adição de elementos perlizantes, a presença de estabilizadores da perlita e também o tempo de desmoldagem. Mesmo não havendo alteração destas variáveis no estudo realizado, a comparação dos percentuais de perlita resultantes no processo atual e no proposto se faz necessário devido às exigências do cliente quanto à microestrutura.

Em uma rápida análise é possível observar um ligeiro aumento nos percentuais de perlita no processo proposto, 26% máximo ante 25% máximos, do processo atual. Comparando os valores encontrados com o exigido pelo cliente, nota-se que as ambas as condições atendem à especificação, e sua presença é influenciada por outras variáveis como composição química, presença de elementos ferritizantes, pelo resfriamento e número de nódulos. Geralmente os valores máximos de ferrita também são especificados pelo cliente, como mostrado na tabela 3.

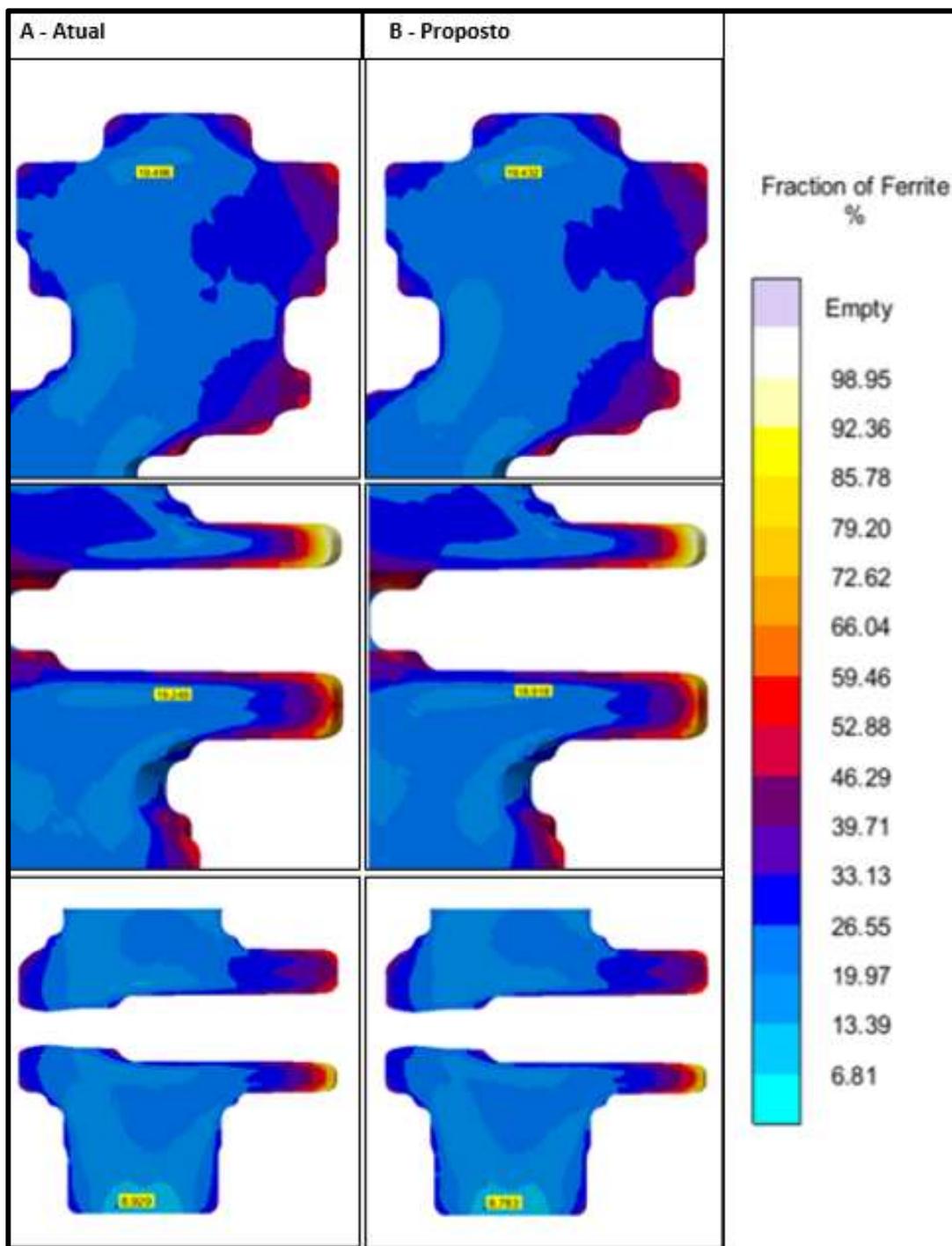
Tabela 3 – Microestrutura especificada pelo cliente

MATRIZ (%)			
Perlita	Ferrita	Cementita	Steadita
≥70% - Lamelar	5 a 30 %	1% máximo	---

Esta fase, apesar de sua presença representar uma redução nos valores de limite de resistência da liga, apresenta características especiais como por exemplo, elevado alongamento, induzindo à alta resistência ao impacto, é uma fase dúctil e confere uma maior facilidade de usinagem ao produto, conforme analisado por Tavares[13].

Seguindo os resultados microestruturais a figura 49 apresenta os valores referentes aos percentuais de ferrita obtidos na simulação.

Figura 49. Percentual de ferrita obtidos na simulação
Fonte: (Autor)/arquivo BR Metals



Os resultados de composição química e da microestrutura originados nas simulações e obtidos nas peças de amostras produzidas, contribuíram com as informações básicas e com os parâmetros de confecção das luvas isolantes e exotérmicas.

6.2 – Análise das luvas produzidas

Foram realizados alguns testes envolvendo as luvas fabricadas, nos quais foi verificado que o produto apresenta boas características para utilização no processo shell molding, para confecção de amostras. As condições de resistência e integridade da luva se mantiveram após a montagem, qualificando-o à produção de amostras, como teste preliminar. A figura 50 apresenta detalhes da luva montada.

Figura 50. Luva montada
Fonte: (Autor)



Após confecção e montagem, além da inspeção visual para detecção de possíveis defeitos superficiais, foram realizadas inspeções dimensionais, como mostra a figura 51, que têm como objetivo básico, avaliar o encaixe da luva no molde durante a montagem, na produção.

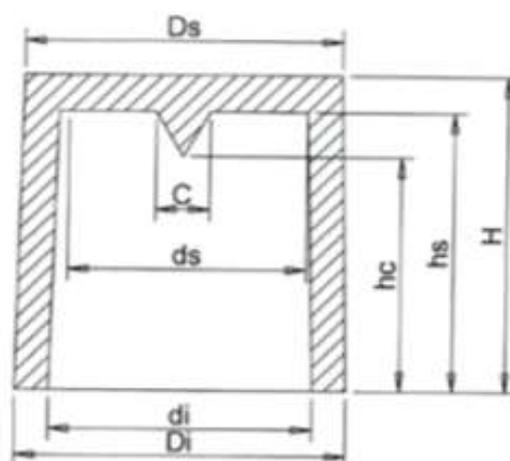
Figura 51. Inspeção dimensional da luva
Fonte: (Autor)



Os resultados da inspeção apontam para uma estabilidade dimensional das luvas, onde todas as dimensões encontradas estavam dentro das tolerâncias especificadas, conforme apresentadas na figura 52.

Figura 52. Dimensões nominais e tolerâncias das luvas
Fonte: Arquivo BR Metals

TIPO K	DI	Ds	H	DI	ds	hc	hs	C
2,5 x 6,0K	42,0 ± 0,8	40,0 ± 0,8	63,0 ± 0,8	26	-	-	-	-
3,5 x 5,0K	52,0 ± 1,1	47,5 ± 1,1	50,0 ± 1,1	33,5 ± 1,1	30,0 ± 1,1	29,0 ± 1,1	40,0 ± 1,1	12,0 ± 1,1
4,0 x 7,0K	60,0 ± 1,1	52,5 ± 1,1	72,5 ± 1,9	39,5 ± 1,5	33,5 ± 1,5	49,0 ± 1,5	59,5 ± 1,5	12,0 ± 1,5
5,0 x 8,0K	69,0 ± 1,1	67,0 ± 1,1	82,0 ± 2,0	48,5 ± 1,5	47,0 ± 2,0	59,0 ± 2,0	69,0 ± 2,0	10,5 ± 1,5
6,0 x 9,0K	80,0 ± 1,2	77,0 ± 1,2	96,0 ± 2,0	59,5 ± 1,5	58,0 ± 2,0	70,0 ± 2,0	81,0 ± 2,0	14,0 ± 1,5
7,0 x 10,0K	91,5 ± 1,2	88,0 ± 1,2	100,0 ± 2,0	70,0 ± 2,0	64,5 ± 2,0	77,0 ± 2,0	89,0 ± 2,0	15,0 ± 1,5
8,0 x 11,0K	100,5 ± 1,2	98,7 ± 1,2	111,0 ± 2,0	79,0 ± 2,0	74,0 ± 2,0	84,5 ± 2,0	97,0 ± 2,0	16,0 ± 1,5
9,0 x 12,0K	110,0 ± 1,6	107,0 ± 1,6	121,0 ± 2,0	89,5 ± 2,0	83,5 ± 2,0	92,5 ± 2,0	109,0 ± 2,0	16,5 ± 1,5
10,0 x 13,0K	122,5 ± 1,8	119,0 ± 1,8	130,0 ± 2,0	99,0 ± 2,0	92,5 ± 2,0	92,0 ± 2,0	110,0 ± 2,0	21,5 ± 1,5
12,0 x 15,0K	148,0 ± 2,0	142,5 ± 2,0	149,5 ± 2,5	118,0 ± 2,5	111,5 ± 2,5	109,5 ± 2,5	133,0 ± 2,5	25,0 ± 1,5
13,0 x 16,0K	164,0 ± 2,0	157,0 ± 2,0	160,0 ± 3,0	130,0 ± 2,5	123,0 ± 2,5	120,0 ± 2,5	143,0 ± 2,5	28,0 ± 1,5
15,0 x 19,5K	190 ± 2,5	180 ± 2,5	195 ± 3,0	150 ± 2,5	141 ± 2,5	180 ± 2,5	203 ± 2,5	25 ± 1,5
15,0 x 21,0K	190,0 ± 2,5	180,5 ± 3,0	220,0 ± 2,5	150,0 ± 2,5	141,0 ± 2,5	180,0 ± 2,5	203,0 ± 2,5	25,0 ± 1,5



Foram realizados também, testes para avaliação da integridade das luvas sobre a atuação de forças externas, avaliando assim a resistência mecânica das luvas. O teste realizado, foi relacionada à avaliação do peso suportado, como

mostrado na figura 53. Este teste é realizado com uma célula de carga apoiada sobre a luva que simula condições de carga/peso a ser suportado durante o trabalho. Os resultados encontrados para a luva produzida, com base nos dados históricos de ensaios realizados pelo fornecedor em peças similares produzidas, aprovaram a luva para uso.

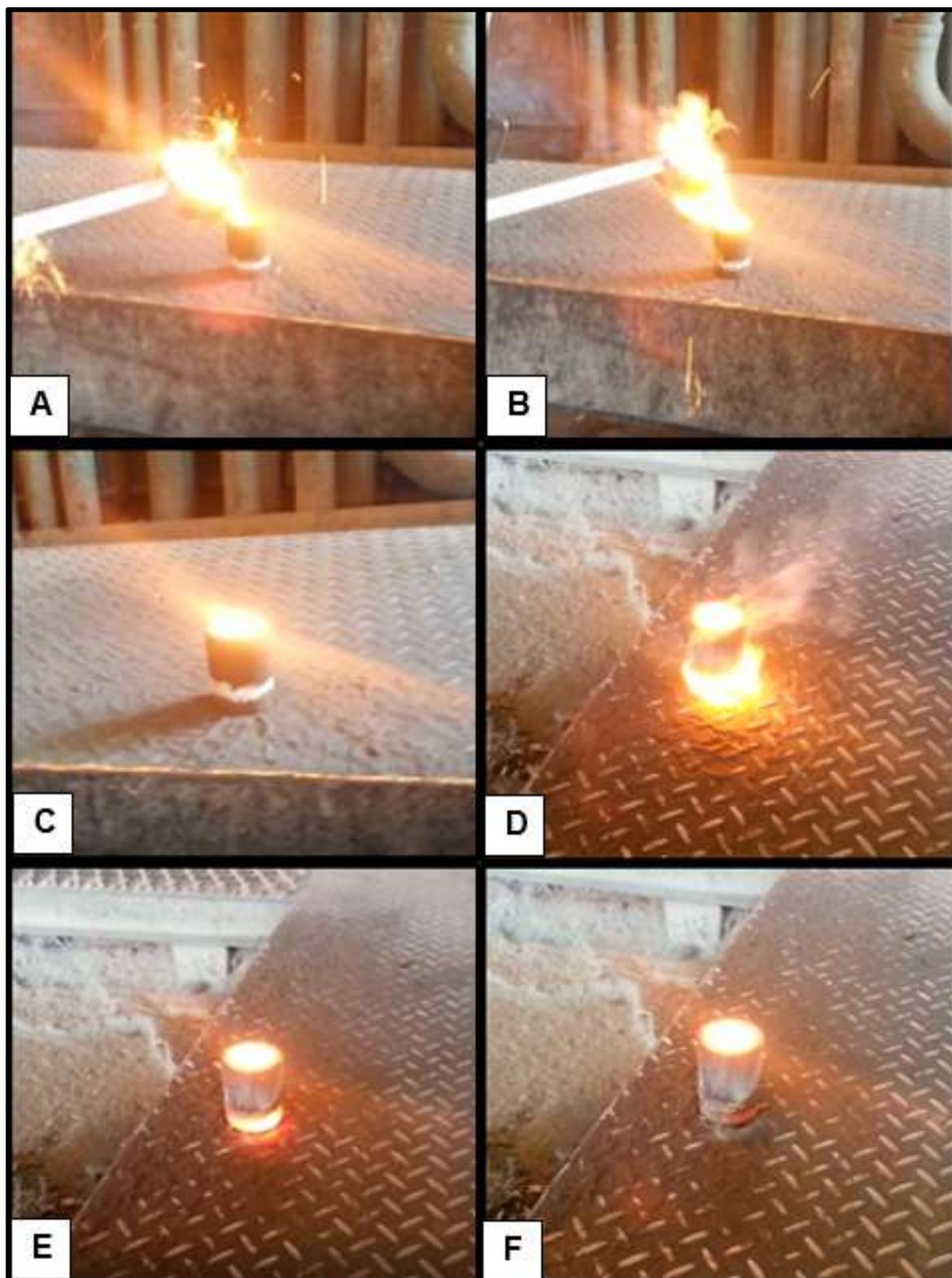
Este teste, apesar de apresentar um resultado referente a resistência mecânica, não significa necessariamente um limitador para o uso no processo de produção de virabrequins, visto que a luva trabalha totalmente protegida. Este teste pode apresentar resultados importantes para armazenamento e transporte das luvas.

Figura 53. Teste de peso suportado pela luva
Fonte: (Autor)



Foi realizado ainda, o teste quanto à integridade da luva sobre a ação do calor. Este é um teste importante para avaliação das propriedades exotérmicas e isolantes das luvas. Através deste teste é possível analisar o comportamento da luva durante o enchimento e do modo de solidificação das peças que a utilizam. Durante o teste realizado, foi possível também avaliar a exotermia da mesma, uma vez que é possível vê-la trabalhando e, no caso das exotérmicas, liberando calor ou queimando, como mostra a figura 54. Nota-se na sequência de imagens, que luva se manteve íntegra até a solidificação final do metal. Este comportamento assegura o completo funcionamento e a eficiência da luva, até o final da solidificação do metal.

Figura 54. Sequência de funcionamento da luva isolante e exotérmica: **(A)**- início de enchimento da luva, **(B)** – final de enchimento da luva, **(C)** – luva cheia de metal líquido, **(D)** – início de funcionamento do tampo exotérmico, liberação de calor, **(E)** – final da exotermia, **(F)** – solidificação da luva
Fonte: (Autor)



6.3 – Análise e caracterização das amostras fundidas

Foram fundidas as amostras iniciais utilizando as novas luvas com o corpo isolante e o tampo exotérmico em quatro peças (dois moldes), considerando as mesmas condições e produzidas junto às peças onde são utilizadas as luvas comuns, no primeiro turno de trabalho, às 11h37min, com temperatura inicial de vazamento de 1442°C e tempos de enchimento de 12 segundos para o primeiro molde e 11 segundos para o segundo molde.

Para a caracterização das peças fundidas como amostras foram realizados os ensaios não destrutivos de inspeção visual (IV) e ultrassom (US), e os ensaios destrutivos de líquido penetrante (LP) e material, dos quais seguem abaixo os resultados obtidos.

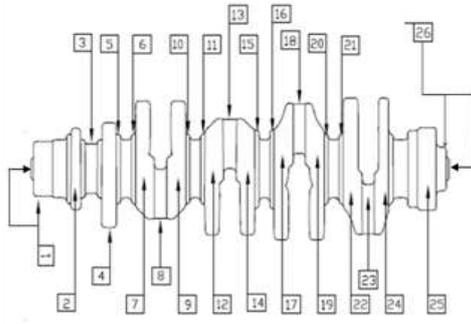
A figura 55 apresenta o reporte de aprovação emitido para aprovação das amostras quanto à inspeção visual.

Figura 55. Report dos resultados do ensaio de inspeção visual
Fonte: Documentação técnica – BR Metals

		RELATORIO DE ENSAIO DE SANIDADE (RES) (Soundness Inspection Report)				RES N°:	TF N°
						811/14	(Our ref.)
		<input checked="" type="checkbox"/> EXTERNA (External) <input type="checkbox"/> INTERNA (Internal)		BRM-IM-0159/08		FOLHA 1 DE 1	8478
						(Sheet) (of)	
DESENHO / ALTERAÇÃO (Drawing / Eng. Change)	DATA DE FUNDIÇÃO (Casting Date)	GRUPO (Group)	MODELO N° (Model Nr.)	ENSAIO <input type="checkbox"/> Ultra Som (Ultrasonic test)	<input checked="" type="checkbox"/> Inspeção Visual (Visual Inspection)		
07K.105.101F / 01	17/07/14	SH-2	7 e 8	<input type="checkbox"/> Líquido Penetrante <input type="checkbox"/> Partícula Magnética (Liquid Penetrant) (Magnaflix)			
QUANTIDADE (Quantity)	EQUIPAMENTO (Equipment)	TRANSDUTOR (Transducer)	CORRENTE (Tipo/Amperagem) (Current)	TECNICA (Method)	MOTIVO DO ENSAIO (Reason of Testing)		
04					Amostra		
PARTICULA (COR / VIA / COD. FAB) (Particle)			PENETRANTE (TIPO / COD. FAB) (Penetrant)		REVELADOR (COD. FAB) (Reveal)		
RESULTADO DO ENSAIO (Testing Result)							
				Foi realizado inspeção visual e todas as peças foram aprovadas.			

Como apresentado na figura 56, foram realizadas as inspeções por ultrassom, técnica utilizada para detecção de micro porosidades e ou descontinuidades, nas quatro amostras fundidas e, não foram detectadas as falhas microestruturais.

Figura 56. Report dos resultados dos ensaios de ultrassom (US)
Fonte: Documentação técnica – BR Metals

BR Metals Fundições				RELATÓRIO DE ENSAIO DE SANIDADE (RES) (Soundness Inspection Report)		RES Nº: 812/14	TF Nº (Car. ref.) 8478
				<input type="checkbox"/> EXTERNA (External) <input checked="" type="checkbox"/> INTERNA (Internal) BRM-IM-0159/08 (Sheet) (of)		FOLHA 1 DE 2	
DESENHO / ALTERAÇÃO (Drawing / Eng. Change)	DATA DE FUNDIÇÃO (Casting Date)	GRUPO (Group)	MODELO Nº (Model Nr.)	ENSAIO <input checked="" type="checkbox"/> Ultra Som (Ultrasonic test)	Inspeção Visual (Visual Inspection)		
07K.105.101F/01	17/07/14	SH-2	7 e 8	<input type="checkbox"/> Líquido Penetrante (Liquid Penetrant)	<input type="checkbox"/> Partícula Magnética (Magnaflix)		
QUANTIDADE (Quantity)	EQUIPAMENTO (Equipment)	TRANSDUTOR (Transductor)	CORRENTE (Tipo/Amperagem) (Current)	TECNICA (Method)	MOTIVO DO ENSAIO (Reason of Testing)		
04	GE USM 35	Normal- 2Mhz		Contato Direto	Amostra		
PARTÍCULA (COR / VIA / COD. FAR) (Particle)			PENETRANTE (TIPO / COD. FAR) (Penetrant)		REVELADOR (COD. FAR) (Reveal)		
				Realizado ensaio de Ultra Som nas regiões indicadas na foto pelos números de 1 a 26.			
				RESULTADO:			
				Não apresentou descontinuidades.			

Em função da complexidade geométrica das peças e por também ser uma exigência do cliente, uma das amostras foi enviada ao laboratório para o ensaio de líquido penetrante (LP). Este ensaio, no caso dos virabrequins, trata-se de um ensaio destrutivo, onde a amostra é seccionada e desta forma, seja possível realizar o teste específico para avaliação e detecção de possíveis descontinuidades microestruturais. Os resultados apresentaram resultados muito bons, expondo uma microestrutura isentas de porosidades como mostra a figura 57.

Figura 57. Report dos resultados dos ensaios de líquido penetrante (LP)
 Fonte: Documentação técnica – BR Metals

		RELATORIO DE ENSAIO DE SANIDADE (RES)				RES N°:	TF N°
		(Soundness Inspection Report)				879/14	(Chm. ref.)
DeCQ		<input type="checkbox"/> EXTERNA (External)		<input checked="" type="checkbox"/> INTERNA (Internal)		FOLHA 1 DE 1	8478
				BRM-IM-0159/03		(Sheet)	(of)
DESENHO / ALTERAÇÃO (Drawing / Eng. Change)	DATA DE FUNDIÇÃO (Casting Date)	GRUPO (Group)	MODELO N° (Model Nr.)	ENSAIO <input type="checkbox"/> Ultra Som (Ultrasonic test)	<input type="checkbox"/> Inspeção Visual (Visual Inspection)		
07k.105.101F/01	17/07/14	SHELL	7 e 8	<input checked="" type="checkbox"/> Líquido Penetrante (Liquid Penetrant)		<input type="checkbox"/> Partícula Magnética (Magnaflux)	
QUANTIDADE (Quantity)	EQUIPAMENTO (Equipment)	TRANSDUTOR (Transductor)	CORRENTE (Tipo/Amperagem) (Current)	TECNICA (Method)	MOTIVO DO ENSAIO (Reason of Testing)		
02	Serra Dacco			Visual	Amostra		
PARTÍCULA (COR / VIA / COD. FAR) (Particle)			PENETRANTE (TIPO / COD. FAR) (Penetrant)		REVELADOR (COD. FAR) (Reveal)		
			B1 VP 34 – Metal Chek		D 70 Metal Chek		
RESULTADO DO ENSAIO (Testing Result)							
FOTO REPRESENTATIVA				Resultado:			
				Não foi detectado descontinuidades.			

Os resultados de material são apresentados na figura 58, evidenciando o atendimento às exigências do cliente e corroborando os resultados obtidos na simulação.

Figura 58. Report dos resultados da composição química (CQ)
 Fonte: Documentação técnica – BR Metals

1) Composição Química (%)												
Chemistry Composition												
	C	Si	Mn	S	Cr	Cu	Mg	P	Sn	Zr	Ti	Al
Especificação do Cliente												
Customer's specification												
Valor mínimo	3,4	1,9	---	---	---	---	≥ 0,03	---	---	---	---	---
Minimum												
Valor máximo	4,0	2,7	≤ 0,8	≤ 0,02	≤ 0,1	≤ 1,0	---	≤ 0,1	≤ 0,1	---	---	---
Maximum												
Especificação Interna												
Internal Specification												
Valor mínimo	3,55	2	0,60	0,004	---	0,20	0,03	---	0,03	---	---	---
Minimum												
Valor máximo	3,70	2,25	0,65	0,014	0,04	0,30	0,05	0,04	0,04	---	---	---
Maximum												
Análise Encontrada												
Actual												
Coquilha	3,7	2,2	0,6	0,009	0,02	0,22	0,04	0,03	0,03	---	---	---

A figura 59 apresenta os resultados das propriedades mecânicas obtidas nas amostras fundidas e a comparação com o exigido pelo cliente.

Figura 59. Report dos resultados de propriedades mecânicas (PM)
Fonte: Documentação técnica – BR Metals

2) Propriedades Mecânicas				
Mechanical Properties				
	Dureza Brinell Hardness	Resistência à tração (N/mm ²) Tensile Strength (N/mm ²)	Limite de escoamento (N/mm ²) Yield Strength (N/mm ²)	Alongamento (%) Elongation (%)
Especificação do Cliente Customer's specification	215 a 270	650 mínimo	380 mínimo	3 % mínimo
Valores Encontrados Actual				
HB da Peça	252 (superfície) 242 (núcleo)	763	429	5,8
HB do Plano de controle1	269 (núcleo)	---	---	---
HB do Plano de controle2	269 (núcleo)	---	---	---
HB do Plano de controle3	252 (superfície) 255 (núcleo)	---	---	---
HB do Plano de controle4	269 (núcleo)	---	---	---

A figura 60 apresenta os resultados da análise metalográfica, realizada nas amostras.

Figura 60. Report dos resultados da análise metalográfica
Fonte: Documentação técnica – BR Metals

3) Análise Metalográfica									
Metalography analysis									
	GRAFITA Graphite					MATRIZ (%) Matrix (%)			
	Forma Form	Tamanho Size	Disposição Distribution	Nodulização Nodularity	Nódulos Nód/mm ² Nodule Count	Perlita Perlite	Ferrita Ferrite	Cementita Cementite	Steadita Steadite
Especificação do Cliente: Customer's Specification	VI	5 a 8	---	90 % esferoidal	---	Perlita lamelar; teor de Ferrita – 5 a 30 %	Máximo, 1%	---	---
Análise Encontrada Actual									
Micro da Peça	V -VI	6 – 7 - 8	---			95	05	ausente	ausente
Micro Plano de controle 1	V -VI	6 – 7 - 8	---	98 %	219	95	05	ausente	ausente
Micro Plano de controle 2	V -VI	6 – 7 - 8	---	98 %	219	90	10	ausente	ausente
Micro Plano de controle 3	V -VI	6 – 7 - 8	---	98 %	219	95	05	ausente	ausente
Micro Plano de controle 4	V -VI	6 – 7 - 8	---	98 %	219	90	10	ausente	ausente

A figura 61 apresenta a posição de obtenção dos corpos de prova utilizados para realização dos ensaios, enquanto a figura 62 apresenta os detalhes da microestrutura obtida nas amostras, com e sem ataque de ácido, obtidas por ensaio metalográfico.

Figura 61. Posição dos corpos de prova para realização das análises
Fonte: Documentação técnica – BR Metals

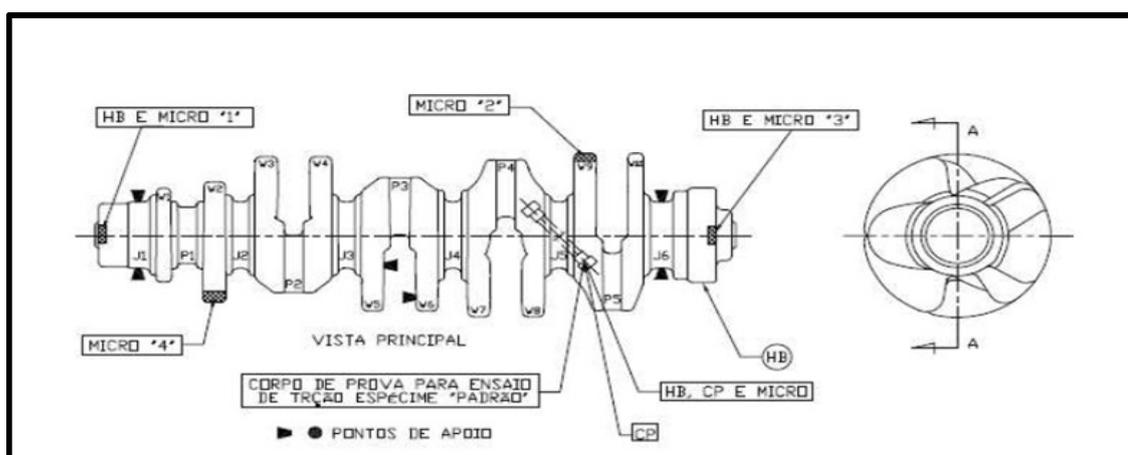
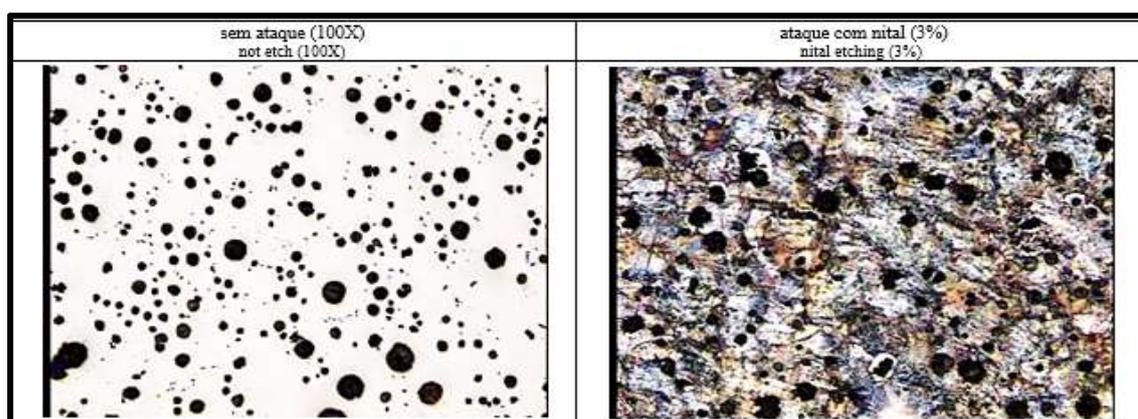


Figura 62. Imagem da metalografia realizada nas amostras.
Fonte: Documentação técnica – BR Metals



Os resultados apresentados na figura 62, fecham a sequência de produção e caracterização das amostras e nos fornecem dados para uma análise técnica a respeito do material produzido e fornecendo um parecer favorável a utilização das referidas luvas para a fundição de maiores lotes de amostras, alinhados com os resultados obtidos por Nimesh[33], White[34], Foseco [35] e Mandaliya [36].

7. CONCLUSÕES

Além do bom funcionamento da luva concebida com o corpo em material isolante e o tampo em material exotérmico, observado em um primeiro momento, o princípio de construção de luvas compostas por duas partes, também revelou bons resultados. Este artifício poderá ser aplicado em situações onde os perfis das luvas representem dificuldades de serem moldados.

O objetivo primário do trabalho foi atingido com a luva construída com o corpo em material isolante e topo em material exotérmico, que também apresentou uma boa resistência mecânica e manteve-se íntegra até o final do vazamento e solidificação das amostras. A fragmentação da mesma ocorreu no resfriamento.

Quanto às micro porosidades, não foram observadas formação de porosidades intercelulares. Lembrando que o aparecimento deste tipo de defeito microestrutural, quase sempre tem influência direta da garganta ou pescoço de ligação entre a peça e o massalote, com o grau de nucleação do banho metálico, com a temperatura de vazamento, com a rigidez do molde, com a pressão interna do molde, entre outras variáveis.

O estudo destas variáveis apresentou resultados promissores e a possibilidade de trabalhos direcionados a pontos específicos, visto que o processo Shell com enchimento por baixo, tem algumas características especiais e frequentemente são observadas irregularidades típicas, como a distância entre a peça e o massalote. Este fato pode criar uma região com condições térmicas da areia, mais altas que o restante do conjunto, alterando as condições do módulo térmico do pescoço do massalote elevando-o a valores maiores que o módulo geométrico calculado, induzindo à formação de rechupe. Outro desvio que é bastante comum e que foi também observado neste trabalho em análises realizadas nos massalotes, foi o alívio da pressão de expansão da grafita. Esta conclusão parte da observação de gotas de reenchimento nos massalotes que mostra que, em um primeiro momento o massalote consegue atender a necessidade de metal líquido, para a contração primária da peça e, em seguida, o conjunto consegue liberar parte da pressão ferrostática gerada na cavidade do molde, na forma de refluxo de líquido para o massalote que ainda permanecia líquido. Logo depois ocorre o fechamento do pescoço. Como o restante da expansão da grafita ocorre já com o pescoço fechado,

isolando assim a cavidade do molde, há uma grande contribuição da mesma para a anulação das forças necessárias à formação dos rechupes.

Os resultados observados apontaram a um bom funcionamento da luva de corpo em material isolante e tampo em material exotérmico que apresentou boas características para a alimentação primária, que muito depende do volume calculado e boas características para o combate à nucleação do rechupe secundário, estes dependentes de bons cálculos e dimensionamento e das condições térmicas desenvolvidas pelo sistema de alimentação. Neste trabalho a formação de rechupes secundários foi evitada através do acúmulo de pressão gerada com a expansão volumétrica da grafita, resultando em poças de líquido intercelular com elevada pressão. Este excesso de pressão armazenada no líquido intercelular evita que a redução de pressão devido à contração secundária diminua a pressão do metal a níveis críticos, capazes de formar os rechupes intercelulares.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação da possibilidade de redução do volume do massalote, adotando como premissa o aumento do módulo real do massalote, comparado ao módulo geométrico calculado, induzido pela temperatura desenvolvida pelo sistema de luva combinada, possibilitando uma redução de custos de produção.
- Avaliação do funcionamento da luva com o corpo isolante e o tempo exotérmico, considerando volumes maiores de metal.
- Avaliação do funcionamento da luva com o corpo isolante e o tempo exotérmico, considerando outros processos de fundição.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **SOARES, Glória Almeida. Fundição – mercado, processos e metalurgia.** Coppe. Rio de Janeiro, 2000.
2. **COSTA, Roberto Seabra, A qualidade nas fundições - Metais & Fundição Brasil — Edição 22, 04/2008.**
3. **GUESSER, W, L. & GUEDES, L. C. Desenvolvimentos recentes em ferros fundidos aplicados à indústria automobilística.** Seminário da Associação de Engenharia Automotiva, São Paulo, 1997.
4. **ABIFA. História da Fundição – Magma Cultural & Salus – 2009**
5. http://www.magmasoft.com.br/pt_BR/solutions/coreandmold.html - acessado em **12/08/2015.**
6. **PALADINI, Edson Pacheco. Gestão da Qualidade: teoria e prática.** São Paulo. Atlas, 2004.
7. **SANTOS, A B.S.; BRANCO, C.H.C. Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares.** São Paulo: IPT, 1991.
8. **CALLISTER JR., WILLIAM D., Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução,** 1a ed., Rio de Janeiro, LTC, 2002.
9. **GUESSER, W L. Propriedades mecânicas dos ferros fundidos,** 1ª edição, São Paulo: Editora Blucher, 2009.
10. **CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos,** 7ª edição, São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2002.
11. **LOPES, Carlos Henrique. Curso básico de Metalurgia.** Barra do Pirai, Thyssenkrupp Fundições, 2006.
12. **SENAI/CETEF – MG. Ferros fundidos com grafita esferoidal.** Itaúna. 2002.

13. TAVARES, F.C. Lee. **Efeito da composição química de carga na microestrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular ferrítico**. Rio de Janeiro: UFRJ. 1997. (tese de mestrado).
14. NASCIMENTO, DÁCIO DO; **Ferros Fundidos**. Sociedade Educacional De Santa Catarina Sociesc - Escola Técnica Tupy – Joinville. 2009
15. SANTOS ADALBERTO B. DE S., **Efeito de algumas variáveis na inoculação de ferros fundidos**. Congresso Nacional de Fundição, ABIFA, São Paulo, 1993.
16. SENAI/CETEF – MG. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. Itaúna. 2005.
17. FONSECA, MARCO TÚLIO DA. **Metalurgia básica**. CETEC, Itaúna 2004.
18. SOUZA SANTOS, ADALBERTO BIERRENBACH DE; CASTELLO BRANCO, CARLOS HAYDT. **Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares**. São Paulo, IPT, 1977.
19. SOUZA SANTOS, A B; CASTELLO BRANCO, C H. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**, São Paulo, IPT, 1989.
20. SANTOS, A B. S.; ALBERTIN, E. **Defeitos de origem metalúrgica em peças de seção espessa de ferro fundido nodular**. Simpósio sobre defeitos em peças fundidas, Joinville, ABM, 1979.
21. BR Metals – R. Fuoco - LMMC , **Caracterização de porosidade em virabrequim** - IPT - Março 2007
22. PIESKE, A; CHAVES FILHO, L M; REIMER, J F. **Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade**. SOCIESC, 1976.
23. SILVA, JOSÉ GERALDO DA. **Alimentação e enchimento de peças fundidas vazadas em molde de areia** – treinamento prestado à indústria de fundição – BR Metals, 2008.

24. FONSECA, MARCO TÚLIO DA & ABREU, ALÍRIO GERSON DA SILVA.

Alimentação e enchimento de peças fundidas vazadas em moldes de areia.

CETEC, Itaúna 2003.

25. KRUGER, M., LUCKOW, I. C., BERGMANN, S.J., SOUZA SANTOS, A.B. DE,

Efeitos de elementos de liga na formação de ferrita e perlita em ferros

fundidos nodulares. 53o Congresso Anual da Associação Brasileira de

Metalurgia e Materiais ABM. Belo Horizonte, 1998.

26. OLIVEIRA, EDSON BISPO. **Comparação dos processos de fundição e**

forjamento, São José dos Campos, 2011.

27. BR METALS, **O processo Shell Molding.** Descrição normativa do processo.

28. CARLOS, GUESSER e BAUMER, **O uso da simulação do processo de**

fundição no desenvolvimento de peças em ferro fundido nodular, Volta

Redonda, IV Seminário de Fundição, maio/2003.

29. T. A. SOUSA; R.P. SILVA; T.A. RAMOS; A. CARDOSO; R.OLIVEIRA. **Análise do**

comportamento do ferro fundido nodular ggg60 no processo shell molding e

comparação com software magma. São Paulo, 16º Congresso de Fundição,

outubro/2013.

30. DR. HEINZ BERNDT. **Processo shell: materiais e tecnologia, Série ABIFA.**

31. R. FUOCO, E.D. CORRÊA - **Rechupes secundários em ferros fundidos**

nodulares: características e soluções – CONAF 2009 – SP

32. J.NIRESH, DR.S.NEELAKRISHNAN, G.ARJUN, P.GOWTHAM, S.HARISH -

Analysis of Reduction in Shrinkage Defect in Reciprocating Piston - IJSRD –

International Journal for Scientific Research & Development| Vol. 4, Issue 03, 2016

- ISSN (online) – acessado em 02/11/2017.

33. NIMESH A. KHIRSARIYA, M.S.KAGTHARA, P.J.MANDALIA - **Reduction Of Shrinkage Defect In Valve Body Casting Using Simulation Software** – acessado em 02/11/2017.
34. D. WHITE - **Avoiding Shrinkage Defects and Maximizing Yield in Ductile Iron** Elkem Metals, Inc, Boca Raton, FL USA - AFS Proceedings 2012 © American Foundry Society - USA
35. FOSECO - **Sleeve Effectiveness to increase Yield. A casting simulation based study** – Foseco – USA – 2016.
36. P.J. MANDALIYA, K.D. SARADAVA, DR. P.S. PURANIK - **Case Study: To Reduce Shrinkage Defect In Piston Sleeve Manufactured By Sand Casting Process Using Simulation Software** - Open Journal of Engineering Research and Technology - Volume 1, Issue 1 (2016).