

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE VAZAMENTO NA GERAÇÃO DE
DEFEITOS DE SOLIDIFICAÇÃO EM AÇO FUNDIDO

Lucas Machado Moreira

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Vinícius Karlinki de Barcellos

Porto Alegre

2016

LUCAS MACHADO MOREIRA

**A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE VAZAMENTO NA GERAÇÃO DE
DEFEITOS DE SOLIDIFICAÇÃO EM AÇO FUNDIDO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte das exigências para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Porto Alegre, 09 de dezembro de

2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Vinicius Karlinski de Barcellos
Coordenador do Laboratório de Fundição da UFRGS

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela
Coordenador do Laboratório de Siderurgia da UFRGS

Prof. Dr. Afonso Reguly
Coordenador do Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS

Dedico esse trabalho a todos os brasileiros que me proporcionaram os estudos de metalurgia em uma universidade federal pública...

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Vinícius Karlinski por toda a sua colaboração, conselhos e indicações de material para o meu aperfeiçoamento profissional.

Ao Leandro Consul, por ter me mostrado mais profundamente o fascinante mundo da fundição, por me disponibilizar sua biblioteca particular e pelos inúmeros conselhos profissionais.

A empresa Siderúrgica Catarinense por ter depositado confiança para o desenvolvimento do meu trabalho. Também agradeço a todo o seu corpo técnico e operacional que foi de extrema importância para o trabalho.

Aos meus pais e irmã que sempre me deram força nos momentos difíceis e brindaram comigo os sucessos ao longo da minha vida acadêmica.

Agradeço também a minha companheira que vivenciou cada momento do trabalho e todos os estresses que o mesmo gerou em minha vida e sempre me ajudou.

Ao Laboratório de Siderurgia por ter sido meu primeiro contato com a metalurgia e por ter me proporcionado inúmeros momentos de aprendizado para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

SUMÁRIO

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VIII
LISTA DE TABELAS	IX
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 Ligas	6
3.2 Rotas de produção	7
3.3 Processo produtivo	10
3.3.1 Projeto	11
3.3.2 Modelagem	11
3.3.3 Macharia	13
3.3.4 Moldagem	14
3.3.5 Fusão e vazamento	16
3.4 Defeitos de fundição	22
3.4.1 Rechupe	24
3.4.2 Gases	25
3.4.3 Microporosidades	26
3.4.4 Outros	27
3.5 Projeto	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 Materiais	30

4.2 Métodos	34
4.2.1 Corte	34
4.2.2 Simulação computacional	34
4.2.3 Análises metalográficas	34
4.2.4 Ensaio de fluidez	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 Análises metalográficas	41
6 CONCLUSÕES	47
7 TRABALHOS FUTUROS	50
8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	51

RESUMO

Esse trabalho foi desenvolvido em uma empresa de fundição de aços, em uma peça do setor ferroviário - prato pião - que apresentava uma grande fração de defeitos de solidificação, prejudicando assim o processo produtivo da empresa devido ao alto retrabalho e refugo da peça. Então, o objetivo principal é a redução da geração de defeitos de solidificação no prato pião em aço fundido AISI 1030; os objetivos secundários são a qualificação desses defeitos de solidificação e da fluidez do material fundido e, além destes, o efeito da espessura na geração de defeitos. Foram realizados corte transversal da peça, análise microscópica, simulação computacional, ensaio de fluidez em espiral e vazão em um corpo de prova em escada.

Palavras-chaves: fundição, aço fundido, defeitos de solidificação, gás, fluidez, simulação computacional, Click2Cast e prato pião.

ABSTRACT

This coursework was developed in a steel casting company, on a piece from the railway sector - centre plate - which presented a great amount of solidification defects, jeopardizing the production process due to constant rework and piece reject. Therefore, the main objective is reducing the generation of solidification defects on the centre plate in cast steel AISI 1030; the secondary objectives are the qualification of these solidification defects and the fluidity of the cast material, besides the effect of the thickness in the generation of faults. Transversal cut of the piece, microscopic analysis, computational simulation, fluidity trial in spiral and outflow in a sample were carried out.

Key-words: casting, cast steel, solidification defects, gas, fluidity, computational simulation, Click2Cast and centre plate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.1 Truque com suas peças identificadas
- Figura 1.2 Gráfico da composição de custos.
- Figura 3.1 Classificação dos principais processos de fundição.
- Figura 3.2 Figura esquemática para a produção por cera perdida.
- Figura 3.3 Desenho representativo do vazamento de metal em molde rotativo por fundição centrífuga.
- Figura 3.4 Tipo de solidificação para ligas.
- Figura 3.5 Influência da quantidade de inclusões na viscosidade.
- Figura 3.6 Influência da injeção de argônio com a fluidez.
- Figura 3.8 Formação do microporos na região interdendrítica
- Figura 3.9 Distância de alimentação do massalote
- Figura 4.1 Desenho e dimensões da peça prato pião
- Figura 4.2 Modelo em escada e suas vistas
- Figura 4.3 Modelo em espiral e suas vistas
- Figura 4.4 Fluxograma da metodologia.
- Figura 5.1 Corpos de prova
- Figura 5.2 Corpo de prova com macro-rechue
- Figura 5.3 Metalografia do corpo de prova
- Figura 5.4 Metalografia do corpo de prova na espessura de 40 mm com aumento de 100x.
- Figura 5.5 Quantificação de fases no AISI 1030 bruto de fusão a) para espessura de 40 mm b) para espessura de 3 mm
- Figura 5.6 Metalografia da peça com aumento de 100x

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Classificação dos aços AISI

Tabela 3.2 Comparação entre as propriedades conforme o material do modelo.

Tabela 3.3 Granulometria da areia x aplicação.

Tabela 3.4 Defeitos de solidificação

Tabela 5.1 Composição química da liga vazada

Tabela 5.2 Temperaturas de vazamento e tempos de preenchimento da peça e do corpo de prova escalonado.

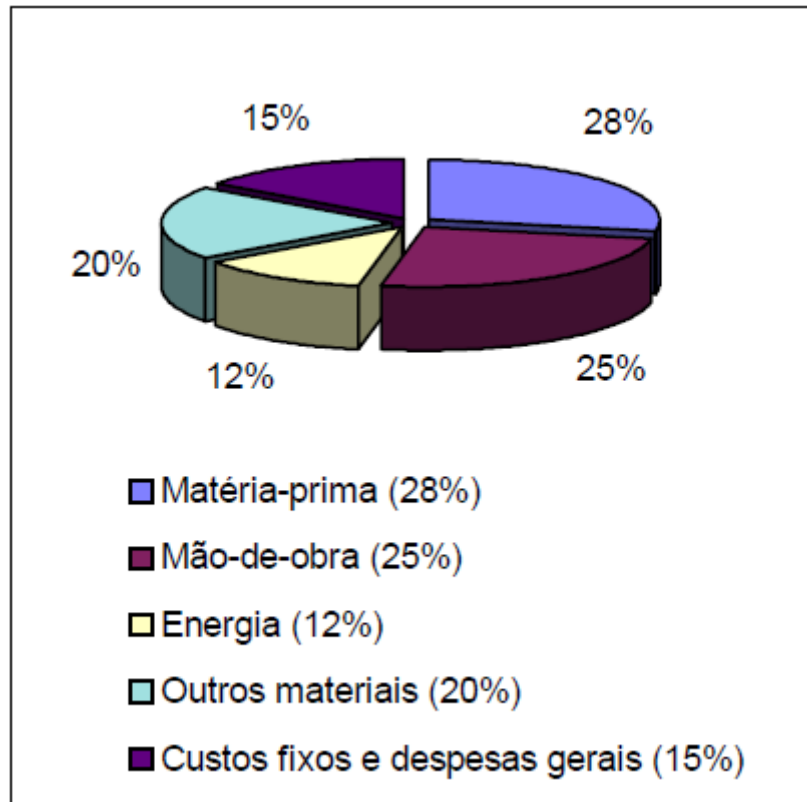
1 INTRODUÇÃO

Devido à crise mundial, o setor de fundição brasileiro sofreu uma redução de 18,19% e 14,68% na produção total e no pessoal empregado, respectivamente, comparando 2014 e seu ano seguinte (ABIFA, 2015). Devido a isso, muitas empresas do segmento decretaram falência e fecharam as suas portas, fazendo com que ocorresse uma disputa entre as que se mantiveram em operação para a conquista desses novos clientes. Por isto, as empresas estão buscando formas de enxugar seus processos e otimizá-los com o propósito de conquistar esses novos consumidores.

Existe um leque grande de opções para isto, como redução de custos, estabelecimento de parcerias com fornecedores-chaves, capacitação dos funcionários, utilização de matérias-primas qualificadas, procedimentos estabelecidos e claros a todos, utilização das ferramentas da qualidade e redução ou eliminação de retrabalho e peças refugadas. É válido lembrar que essas medidas além de otimizar e enxugar o teu processo, também passarão credibilidade aos clientes.

O gráfico da figura 1.2 apresenta os fatores para a produção de uma peça e a composição para o custo da mesma. Então, a partir desses valores pode-se estimar que para que uma peça seja retrabalhada, é necessário a utilização de mais matérias-primas, como eletrodos para a soldagem, energia e mão de obra e, segundo o gráfico estas englobam 55% do custo de produção; logo, se minimizarmos esses defeitos, pode-se ter um ganho financeiro e de qualidade considerável (ABIFA, 2010).

Figura 1.2 Gráfico da composição de custos.

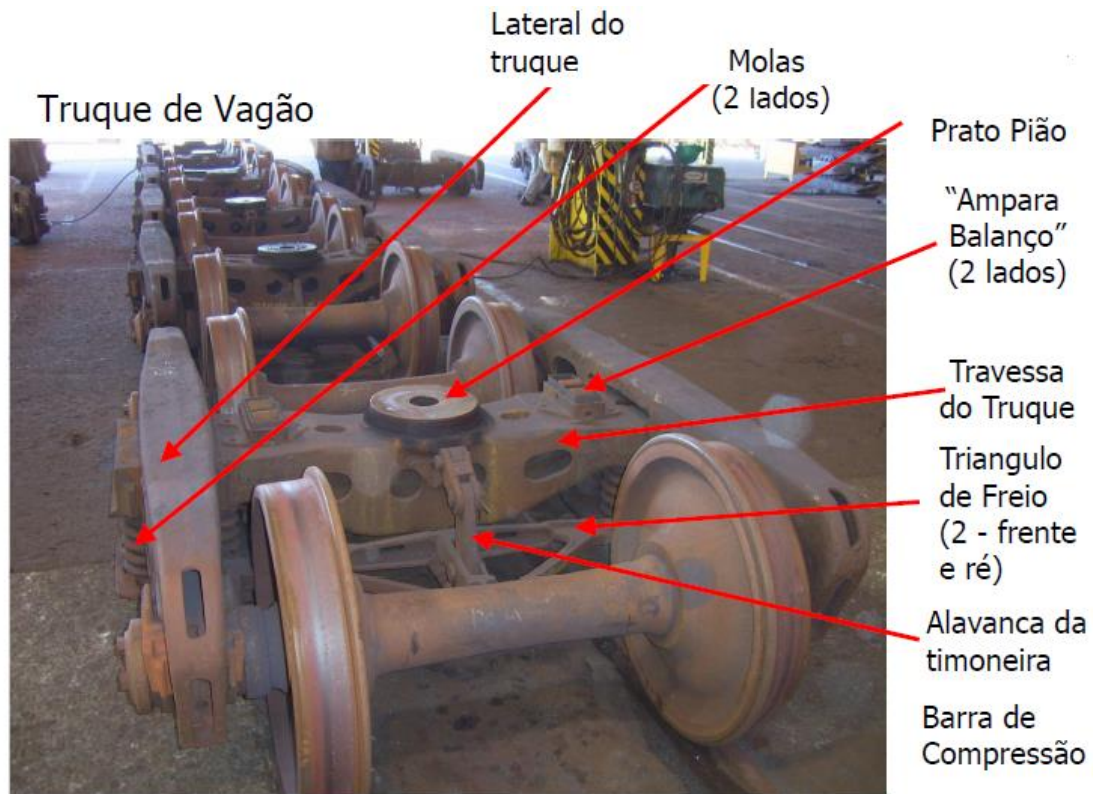


Fonte: ABIFA, 2010.

A empresa onde o trabalho foi realizado é a Siderúrgica Catarinense Ltda., também conhecida como Sical. Produz peças em aço, ferro fundido cinzento, ferro fundido cinzento alta liga, ferro fundido nodular e ligas especiais, para os setores ferroviários, de mineração e siderúrgicos; entre os produtos, foi objeto de estudo neste trabalho uma peça do setor ferroviário fundida em aço, chamada de prato pião (SIDERÚRGICA CATARINENSE, 2016).

A referida peça tem apresentado problemas de porosidades – não diferenciada entre rechupe e gases. O prato pião faz parte do conjunto chamado de truque do vagão, o qual tem como missão realizar o transporte da caixa do vagão, local onde encontra-se a carga a ser transportada pelas ferrovias, como fica evidenciado na figura 1.1. O prato do pião tem o propósito de acoplar o truque à caixa através do pino de encaixe, evitando assim que, conforme ocorra o deslocamento, a velocidade e a aceleração sejam transmitidas também à caixa (ROSA, 2011).

Figura 1.1 Truque com suas peças identificadas



Fonte: ROSA, 2011.

O material utilizado varia conforme a requisição do cliente; no entanto, sempre é aço-carbono não ligado. Esse material apresenta uma baixíssima resistência a corrosão e não é indicado para ambientes com altas temperaturas ou agressivos. O departamento de engenharia de produto seleciona a liga a ser utilizada levando em consideração as solicitações mecânicas da peça e o ambiente de trabalho em que ela estará inserida e, assim, encontra-se uma série de materiais possíveis. Além desta abordagem, também deve ser pensado o valor do quilo da liga para tornar viável o projeto (SOUZA, 2006).

O controle das variáveis do processo, tais como as temperaturas do forno, da panela, do vazamento e o tempo de vazamento são muito importantes para não ser requerido o retrabalho das peças por presença de poros. No contexto de minimizar isto, esse trabalho terá um papel fundamental para se ter o domínio do processo, garantindo peças sãs. Mais, se o resultado do trabalho for positivo, é possível que seja adotada essa abordagem para outras peças e ligas.

O trabalho estará dividido em materiais e métodos, análise dos resultados e conclusões. A primeira parte consistirá em uma explicação sobre os materiais utilizados para o desenvolvimento e as técnicas abordadas para a geração dos resultados de interesse; já na segunda, será realizado um estudo comparativo com o que se esperava segundo as referências bibliográficas utilizadas para a fundamentação do trabalho e o que foi obtido na prática e, a partir disto, será realizado o fechamento com as conclusões.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é otimizar os parâmetros de processo do setor de fusão e vazamento que afetam a sanidade de um prato pião na liga AISI 1030. Os objetivos específicos resumem-se a:

- Identificar e diferenciar os defeitos de porosidade por micro-rechupe e bolhas de gás;
- Identificar as variáveis que podem estar causando esse defeito;
- Realizar ensaios de fluidez do material e;
- Adequar o processo, segundo as informações e conclusões obtidas nesse trabalho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ligas

O aço-carbono é um material que apresenta em sua composição Ferro, Carbono e elementos residuais provenientes da matéria-prima e do processamento, como Enxofre, Silício, Manganês e Fósforo. Seus teores em massa no aço usualmente não ultrapassam 0,040%, 0,30%, 1,65% e 0,05%, respectivamente. A composição química do aço em conjunto com outros fatores, como taxa de resfriamento, tamanho do grão austenítico e microestrutura fornecem as propriedades mecânicas do material (SOUZA, 2006; AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1967).

Através de uma metalografia realizada corretamente, pode-se correlacionar todas as variáveis supracitadas com as propriedades mecânicas. Por exemplo, quanto menor o grão austenítico anterior à tempera, maior a resistência ao desgaste e dureza, mas como contraponto, as propriedades relativas a ductilidade e tenacidade decaem. Outro fator a ser considerado é a relação ao tratamento térmico composição química da martensita resultante, já que, conforme o percentual de carbono aumenta, as propriedades vinculadas a resistência ao desgaste aumentam, e a resistência ao impacto decai. Ademais, busca-se a taxa de resfriamento crítica a fim de se obter uma estrutura cem por cento martensítica (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1967).

Existe uma série de órgãos que normatizaram a classificação das ligas metálicas através das limitações dos teores dos elementos químicos; entre elas, as mais conhecidas são Society of Automotive Engineers (SAE), American Standards of Testing and Materials (ASTM), American Iron and Steel Institute (AISI), Deutsches Institut für Normung (DIN), Japanese Industrial Standards (JIS) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Para uma mesma família de aço em uma norma, existe o seu correspondente para todas as outras; logo, todas as normas conseguem se correlacionar facilmente. Neste trabalho, foi utilizada a mais difundida, chamada AISI e, por isso, essa será explanada com mais detalhes.

As três primeiras são similares em sua abordagem e nomenclatura, e a ABNT as utilizou como base. Elas apresentam quatro ou cinco números depois do seu nome, tal como AISI 1030. Para a primeira situação, os dois primeiros algarismos representam a situação dos elementos residuais, como pode ser visto na tabela 3.1, ao passo que os dois

últimos apresentam a quantidade centesimal em porcentagem de Carbono na liga. Quando, o Carbono excede 1,0%, a nomenclatura apresenta cinco dígitos, como no caso do material AISI 10130.

Tabela 3.1 Classificação dos aços AISI

Tipo	AISI
Aço-Carbono	1xxx
-Simples (Mn<1,00%)	10xx
-Ressulfurado	11xx
-Ressulfurado e resfosforado	12xx
-Com adição de Nióbio	14xx
-Simples (Mn>1,00%)	15xx

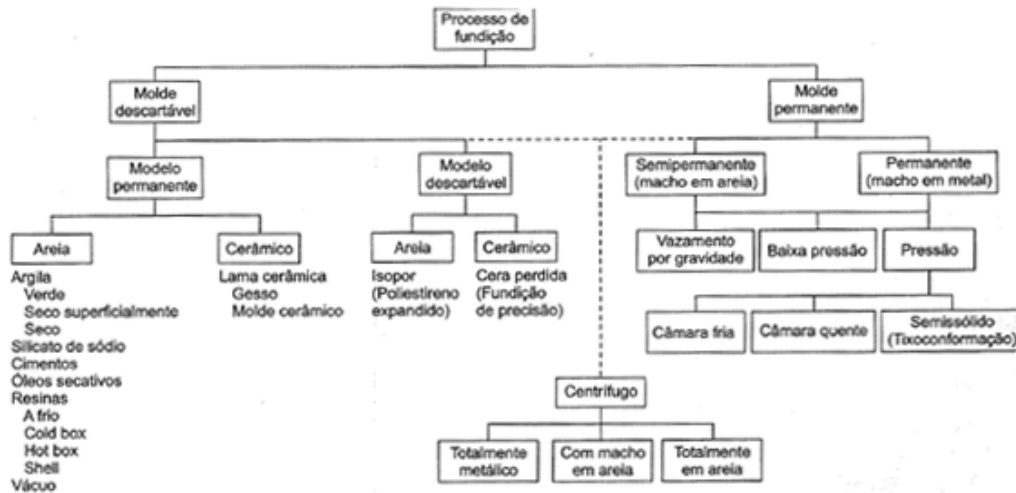
Fonte: adaptado de SOUZA, 2006.

3.2 Rotas de produção

Para a produção de peças metálicas para a indústria ou para o dia a dia, existe um grande leque de opções, tais como laminação, forjamento, estampagem, extrusão – por transformação mecânica-, soldagem, fundição, metalurgia do pó e usinagem. Cada processo possui suas peculiaridades, vantagens e desvantagens, lembrando ainda que dentro deles, existem subdivisões, como forjamento a quente, morno e frio. Como o trabalho será desenvolvido na produção de uma peça por fundição, serão apresentadas as vantagens e desvantagens deste processo. Primeiramente, esse é o caminho mais curto de transformação da matéria-prima bruta nas dimensões finais da peça, o que pode se dizer que é uma grande vantagem. Além disso, pode-se citar que através da fundição é possível produzir peças de pesos variados (gramas a toneladas) e geometrias complexas. Por fim, é de fácil automatização e, usualmente, apresenta propriedades metalúrgicas boas quando comparada com laminação e extrusão, que deixam os grãos da estrutura cristalinas deformados. Apesar de todos esses pontos positivos, a fundição apresenta um grande problema vinculado ao meio-ambiente, já que ainda não foi desenvolvida nenhuma forma de reciclagem para toda a areia utilizada na produção dos moldes. Ademais, é muito difícil obter uma peça por fundição livre de defeitos e, por isso, é necessário ter conhecimento da aceitabilidade para tal peça, empresa e/ou setor (SILVA, 1963).

A seguir serão explanados os principais métodos de fundição utilizados no ramo industrial, conforme pode ser visto na figura 3.1.

Figura 3.1 Classificação dos principais processos de fundição.

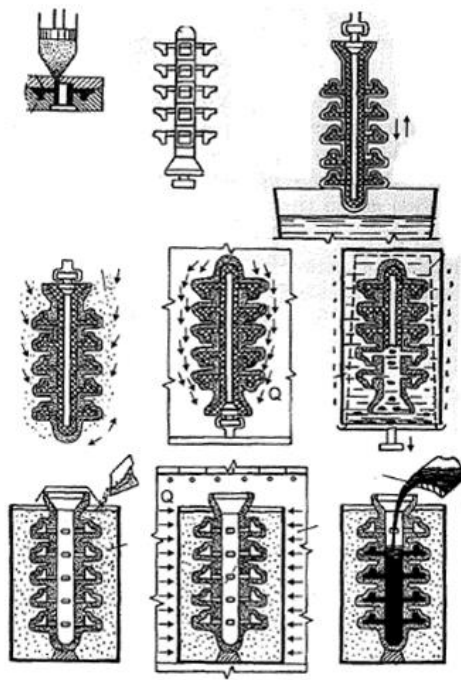


Fonte: BALDAM e VIEIRA, 2014.

Os principais processos de fundição são: moldagem em areia, fundição de precisão (cera perdida), fundição sob pressão, fundição centrífuga e tixocformação. O primeiro é o mais utilizado devido ao seu baixo custo e por atender satisfatoriamente a uma boa variedade de ligas, geometrias simples e complexas e tamanhos variados.

A fundição por cera perdida consiste basicamente na produção do modelo em cera com as dimensões exatas da peça a ser produzida, e inicia-se a produção do “molde” cerâmico através de uma série de banhos de lama refratária intervaladas de jatos de sílica vítrea ou zirconita em pó a fim de gerar um tipo de casca refratária. A seguir, realiza-se a etapa de deceragem, na qual esse conjunto é colocado em um forno para que a cera derreta e esorra para fora, deixando somente o molde refratário. Por fim, a liga escolhida para produção é vazada e são produzidas as peças, conforme a figura 3.2.

Figura 3.2 Figura esquemática para a produção por cera perdida.



Fonte: BALDAM e VIEIRA, 2014.

As principais vantagens desse processo são a redução da usinagem e acabamento superficial da peça, devido ao excelente acabamento superficial que esse processo fornece e a possibilidade de produção de uma peça fundida única, quando em outros processos seriam necessárias formas de ligação. Pode-se citar a possibilidade de fabricação de inúmeras peças em um pequeno intervalo de tempo e espessuras reduzidas.

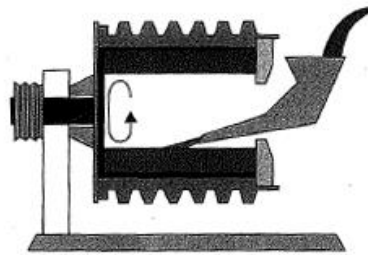
A fundição sob pressão é um processo utilizado majoritariamente para ligas não ferrosas que apresentam uma temperatura de fusão muito inferior à do aço líquido. Este consiste basicamente em uma máquina pneumática com um pistão hidráulico que injeta o metal líquido para dentro do molde metálico, mais conhecido como matriz metálica, através de uma pressão que só cessa quando o material se solidificou. O mais importante desse processo é a matriz, que devido ao seu material (aço-ferramenta) apresenta uma vida útil grande, o que torna viável a utilização deste. Ademais, devido a essa pressão, o preenchimento da peça é melhor já que em processos despressurizados conta-se apenas com a pressão metalostática. Este apresenta uma série de vantagens, como:

- Peças complexas;

- Alta produtividade;
- Paredes finas e dimensional mais estreito;

Para formato tubulares, buchas e cilindros de laminação é utilizado um processo não tão comum, mas de extrema importância para a produção de peças com geometria cilíndricas, conhecido como a fundição centrífuga. Essa utiliza a força centrífuga proveniente da rotação do molde quando o metal líquido é inserido para que ele escorra produzindo assim o tubo, como pode ser visto na figura 3.3. Devido a esse movimento, a estrutura de solidificação da peça apresentada é muito próxima de 100% colunar e livre de defeitos.

Figura 3.3 Desenho representativo do vazamento de metal em molde rotativo por fundição centrífuga.



Fonte: BALDAM e VIEIRA, 2014.

O processo menos popular entre os mais convencionais, conhecido como tixofundição. Essa rota produtiva apresenta as melhores propriedades mecânicas entre todas as possibilidades de fundidos, pois devido a agitação magnética e/ou mecânica imposta quando a peça inicia a sua solidificação, quebra-se a estrutura dendrítica, produzindo uma estrutura globular. No entanto, devido ao maquinário custoso e a complexidade no controle da microestrutura, esse processo ainda não é muito utilizado quando comparados com os anteriores apesar de apresentar propriedades muito similares aos forjados.

3.3 Processo produtivo

A produção de uma peça fundida pode ser dividida em etapas:

1. Projeto;

2. Modelagem;
3. Macharia;
4. Moldagem;
5. Fusão e Vazamento;
6. Rebarbação e Limpeza.

3.3.1 Projeto

Nessa etapa é realizada a análise do desenho técnico ou da peça de amostra a fim de se buscar o desenvolvimento adequado do projeto de alimentação, massalotes, cálculo de contração - sabendo-se a liga a ser utilizada -, a disposição do modelo, os tratamentos térmicos (caso sejam necessário) e as máquinas e tempos de usinagem que serão utilizados caso a peça não seja bruta de fusão. Ainda dependendo do porte da fundição, pode-se utilizar um *software* de simulação numérica computacional do vazamento e da solidificação da peça, sendo uma ferramenta interessante para complementar a visão do projetista.

Esse momento é crucial para o desenvolvimento da peça, pois caso seja mal executada essa etapa, surgirá um efeito em cadeia que provavelmente acarretará uma unidade não conforme, com defeitos e grandes possibilidades de ter de ser retrabalhada ou até refugada. No entanto, quando o projeto é bem elaborado e o processo produtivo está padronizado e conforme, minimizam-se as chances de geração de problemas, otimizando o processo.

3.3.2 Modelagem

O modelo é uma réplica da peça a ser produzida feita de um material que atenda às necessidades da fábrica; ou seja, a decisão do material que será utilizado no modelo depende do tamanho do lote, da precisão dimensional requerida, do processo de moldagem e do tamanho e complexidade da peça (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1967).

A classificação do modelo é dividida quanto as suas partes, tais como: inteiriços, bipartidos, tripartidos e mistos. O primeiro é o mais simples e atende principalmente peças de geometria simples e pequenos lotes. Este não apresenta possibilidades de torná-lo mecanizado. As outras formas apresentam um maior grau de complexidade da peça e grandes lotes. Os modelos tripartidos produzem peças extremamente complexas e são

realizados desta maneira porque não seria possível a produção com apenas um molde e, então, os moldes são dispostos em conjunto.

Os materiais mais utilizados para a confecção destes são madeira, metais (alumínio, latão, ferro fundido e aço) e polímeros (plásticos e poliestireno). A diferença entre eles consiste em sua vida útil de trabalho, manutenção, resistência ao desgaste e peso, conforme pode ser visto na tabela 3.2.

Tabela 3.2 Comparação entre as propriedades conforme o material do modelo.

Características	Material do Ferramental			
	Madeira	Alumínio	Aço	Plástico
Usinabilidade	Excelente	Boa	Média	Boa
Resistência ao desgaste	Baixa	Boa	Excelente	Média
Solidez	Média	Boa	Excelente	Boa
Peso	Baixo	Alto	Muito alto	Alto
Facilidade de manutenção	Excelente	Baixa	Alta	Média
Resistência a corrosão	Excelente	Baixa	Boa	Média
Resistência ao inchamento	Baixa	Excelente	Excelente	Excelente

Fonte: Adaptado de AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1967.

Independente do material ou da forma, todos devem atender a uma série de requisitos, tais como precisão dimensional, permanência da forma e dimensões ao longo do tempo, facilidade de extração através dos ângulos de saída e bom estado das superfícies (superfícies livres de defeitos e irregularidades). Ainda, caso a peça seja usinada, tem de ser considerado o sobremetal de acordo com o que a engenharia definir, o acréscimo para compensar a contração de solidificação que ocorre durante o resfriamento *liquidus-solidus* e as marcações de macho, que tem o papel de permitir o posicionamento do macho (BALDAN e VIEIRA, 2014).

Com o propósito de identificação, e para a compreensão de todos, os modelos são pintados, de acordo SILVA (1984):

- Amarelo: superfícies a serem usinadas;
- Amarelo hachurado de preto: furos de machos a serem usinados;
- Verde: faces e sedes de suplementos descartáveis;
- Preto: marcações de machos;
- Madeira natural hachurada de preto: reforço de modelo para ser enchido na moldação;
- Vermelho: peça de ferro fundido;
- Azul: peça de aço fundido;
- Vermelho ou Azul hachurado de preto: nervuras e reforços a serem destacados após a fundição.

Apesar de existir essa normatização, usualmente nem as modelarias nem as fundições a utilizam, pois a julgam desnecessária.

3.3.3 Macharia

Os princípios técnicos para o desenvolvimento dos machos a serem utilizados no projeto são similares aos da etapa anterior, inclusive quanto aos materiais; no entanto, os machos não são divisíveis em sua grande maioria, já que tornaria mais complexa essa etapa, contrariando o propósito, que é justamente facilitar o processo de obtenção de peças. Os machos são dispostos no molde a fim de criar contornos complexos, buracos e vazios que não podem ser obtidos de outra maneira. As caixas de macho são bipartidas e o material que confeccionará o macho é socado até tomar a forma proposta (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1988; SILVA, 1963; BALDAM E VIEIRA, 2014; CHIAVERINI, 2002).

Estes necessitam apresentar uma forte resistência mecânica e à erosão, para que quando o material fundido entre em contato, o mesmo não entre em colapso, perdendo a sua forma inicial. Além disso, precisa apresentar uma baixíssima contração/expansão quando o molde é preenchido. Por fim, os machos precisam apresentar a menor quantidade de gás residual interno, alta permeabilidade, para que se evite a formação de bolhas - pode acarretar defeitos e a colapsidade -, sendo isso necessário para que o macho não induza tensões residuais na peça devido à restrição de movimento da mesma. Para tanto, o mais comum é a utilização de resinas, silicatos, cimento Portland, entre outros como aglomerantes da areia (CHIAVERINI, 2002).

3.3.4 Moldagem

A areia combinada com ligantes será disposta sobre o modelo e compactada fortemente, podendo ser manualmente ou mecanicamente, a fim de que o bolo de areia obtenha a geometria do modelo. A moldagem em areia é globalmente a mais utilizada e tem subdivisões, como areia com argila, com ligantes químicos, *shell molding* e *cold box* (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1988; BALDAM e VIEIRA, 2014).

O método mais utilizado é o de areia verde devido a sua simplicidade, economia e abordagem para ligas ferrosas e não ferrosas. Este consiste na mistura de areia silicosa, argila e água. As vantagens da areia verde são:

- Mais barato;
- Menor distorção quanto aos outros processos;
- Menor tempo para a areia retornar ao processo;
- Dimensional bom;
- Menor possibilidade de surgimento de trinca a quente.

Apesar disto, esse processo também apresenta algumas desvantagens, como:

- O controle da areia é mais complexo;
- Erosão dentro do molde é mais recorrente;
- O acabamento superficial e a precisão dimensional decaem conforme o peso da peça aumenta;

Esse processo vem sendo substituído paulatinamente pelo de areia seca, devido a sua facilidade de automação, maior resistência mecânica e à erosão, e porque é mais adequado na produção de peças de geometrias mais complexas e maiores. A composição dessa mistura consiste em areia silicosa, resinas e catalisadores. Existe a cura a frio e a quente e sua principal diferença é que uma precisa ser aquecida para que a cura ocorra (temperatura entre 150 e 300° C por 8 a 48 h) ao passo que a fria ocorre imediatamente após a mistura dos constituintes. Deve-se lembrar que na fria é preciso realizar a pintura do molde com tinta refratária.

As vantagens e desvantagens deste são:

- Mais resistentes;

- Melhor acabamento superficial devido a pintura;
- Melhor precisão dimensional;
- Maior chance de ocorrer trinca a quente;
- Maior distorção;
- Necessário mais e maiores equipamentos;
- Produção mais lenta.

Existem ainda outros tipos de moldagem menos utilizados, tais como: areia de furano curada a frio, óleo curada a frio, óleo-oxigênio curada a frio, cura a frio com CO₂ e areia cimento. Todas apresentam suas vantagens e desvantagens conforme a geometria e complexidade da peça, o tamanho do lote e processamento fabril a ser utilizado.

A areia base necessita uma série de características a fim de que se atinja as propriedades que o molde exige. As principais características do molde são a pureza, a presença de orgânicos, a morfologia dos grãos, a granulometria, a densidade, o ponto de fusão e a expansibilidade. É muito raro que se encontre esse constituinte com uma alta pureza, pois vem contaminada, e para eliminar estes contaminantes, a areia é queimada, pois os mesmos podem gerar gases e diminuir a produtividade do processo. A expansibilidade é responsável pela fabricação de defeitos de fundição; por isso, busca-se uma areia com a menor possível. Apesar disto, devido ao baixo custo e a facilidade de encontrar na natureza a areia silicosa, que apresenta uma alta expansibilidade. Para fundições de precisão é utilizada a sílica vítrea apresentando a menor possível. Na tabela 3.3, apresenta-se a relação de granulometria da areia com a aplicação, facilitando a compreensão. Todas estas interferem diretamente nas propriedades do molde (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1988; SILVA, 1963; BALDAM E VIEIRA, 2014; CHIAVERINI, 2002).

Tabela 3.3 Granulometria da areia x aplicação.

Módulo de finura da areia em AFS	Aparência	Aplicação
30-40	Muito grossa	Areia de enchimento para grandes peças de aços e ferros fundidos
40-50	Grossa	Areia de enchimento para peças médias de aços e ferros fundidos e de faceamento com molde pintado posteriormente
50-70	Média	Areia de circuito mecanizado para fundição de peças pequenas de aço e peças médias de não ferrosos
70-90	Fina	Não ferrosos e eventualmente areia de faceamento para pequenas peças de ferro fundido
100	Fina	Não ferrosos, shell molding, macharia de pequenos machos
100-150	Muito fina	Não ferrosos para faceamento
Acima de 150	Finíssima	Não utilizada em fundição

Fonte: BALDAM e VIEIRA, 2014.

Com o propósito de que tudo ocorra de maneira natural e não apresentando nenhum problema, o molde a ser produzido necessita de algumas propriedades, tais como: ser refratário o suficiente para resistir as temperaturas do metal líquido e soltar-se com facilidade após a solidificação, gerar o mínimo de gases possível e apresentar uma boa permeabilidade para que os gerados possam fugir para atmosfera, apresentar resistência mecânica e à erosão para suportar o peso da peça e a ação erosiva do vazamento do metal fundido para dentro do molde (TORRE, 2010).

3.3.5 Fusão e vazamento

A fusão é a transformação da carga metálica sólida em material líquido, visando atender a composição química planejada no cálculo de carga através da passagem de calor proveniente de uma fonte, depois depositado para dentro do molde através dos canais (TORRE, 2010; AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1988). Há uma série de fontes possíveis de calor, como: os fornos cubilô, de reverberação, elétricos a arco, de resistência e de indução, e fornos a vácuo, entre outros. Cada qual possui suas características, vantagens e desvantagens; como o propósito do trabalho não é diferenciá-los, será apenas

explicado o modo de funcionamento do forno de indução, pois é o mais empregado e também foi o utilizado no trabalho.

Esse tipo de forno pode ser dividido em alta e baixa frequência, ambos refrigerados por água corrente, e apresentam refratários como proteção das paredes, podendo ser refratário silicoso, dolomítico ou magnesítico. O primeiro apresenta uma bobina com grande número de espiras e o material a ser fundido consiste em a única espira do secundário de um transformador. Então, pela ação magnética induzida pela corrente alternada, é gerado uma potência de alta intensidade, com capacidade de fundir o metal desde que a resistividade da carga esteja adequada. Já para a segunda opção, são apresentadas duas bobinas, e a carga é disposta entre elas; logo, devido a ação magnética e o efeito Joule, ocorre a geração de uma série de correntes e uma alta potência no núcleo entre as bobinas, produzindo assim calor suficiente para a fusão. Vale lembrar que devido a esses efeitos elétricos e magnéticos de geração de correntes e campos, o material é homogeneizado química e termicamente (AMERICAN SOCIETY FOR METAL, 1988; SILVA, 1963; TORRE, 2010).

A força que promove a solidificação é a perda de calor do metal líquido para o molde, que torna a fase sólida mais estável do que a líquida, promovendo uma modificação de volume que, aliada a outros fenômenos, pode provocar a formação de defeitos (ABREU e FONSECA, 2003). A grande diferença do processamento de fusão e vazamento de uma fundição para as siderúrgicas é a temperatura de vazamento do metal, pois na primeira é necessário uma maior temperatura. Isso deve-se a maior complexidade das peças ao passo que nas siderúrgicas o “molde” é o tarugo, com uma geometria simples. Essa maior temperatura deve-se a necessidade de uma maior fluidez para o material (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1988).

Na panela ocorrem uma série de operações a fim de que sejam seguidas as indicações da engenharia para a geração correta da peça, evitando problemas no vazamento e na peça. Elas são diferentes conforme a variação do processo de fundição para fundição, e do material a ser produzido; ainda assim, existem algumas que são realizadas independentemente destas variações (BALDAM e VIEIRA, 2014), como:

- a) Medição da temperatura: para manter o controle do processo, pois tem de ser alterada conforme a espessura da peça;

- b) Retirada de amostras: com o objetivo de verificar a composição química do banho e realizar a correção da carga;
- c) Correção da composição: ajuste da composição química através da adição de insumos até que sejam atingidas as faixas segundo as normas;
- d) Ajuste da temperatura: para que o metal líquido seja vazado com a temperatura correta segundo a geometria da peça;
- e) Retirada do excesso de escória e durante o vazamento: evitando assim que inclusões exógenas apareçam dentro da peça, normalmente feito com escumadoras;
- f) Formação de escória de proteção: essa etapa é realizada para evitar que o banho metálico entre em contato com a atmosfera, fazendo com que ocorra a oxidação do banho - normalmente é realizado com fluxos comerciais ou com misturas de sílica, cal, dolomita, entre outros.

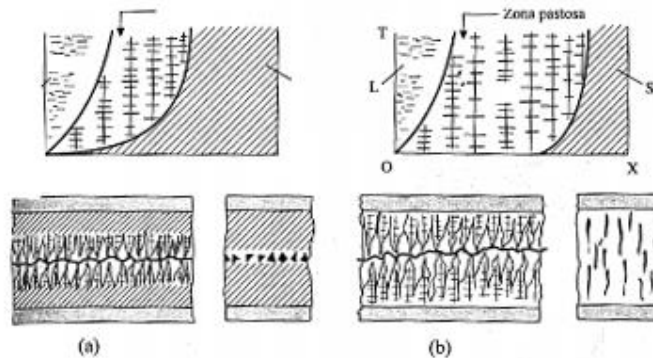
Existem ainda algumas operações que são específicas para a obtenção de um certo material, por exemplo:

- a) Desoxidação: busca-se realizar para a retirada de oxigênio do banho e pode ser feito de maneiras distintas, dependendo do processo. Para aços fundidos é realizado com alumínio, porque apresenta uma alta tendência a reação com oxigênio;
- b) Nodularização e inoculação: etapa realizada no processamento dos ferros fundidos, a fim de se controlar a morfologia da cementita ou grafita;
- c) Desgaseificação: normalmente é realizado para não ferrosos, mas existem alguns aços que também utilizam esse mecanismo de limpeza do aço - realizado através do acoplamento de uma mangueira que insere gás ou utilizando pastilhas.

O controle no forno e no vazamento é crucial, porque é um dos principais agentes geradores de defeitos juntamente, com a etapa de projeto mal executada. Pode-se citar, exemplificando, a composição química, o intervalo de solidificação, a temperatura de vazamento, a fluidez, a presença e a quantidade de inclusões sólidas, uso de desoxidante, uso de escória de proteção, tempo de vazamento e altura de vazamento. Através da manipulação e interação entre as mesmas, pode-se correlacioná-las com os defeitos de fundição que surgem através de estudos.

- a) Composição química: esse fator influencia no intervalo de solidificação, pois existem elementos e compostos que se formam e alteram o modo de solidificação do material; no entanto, como a composição é de acordo com as normas e os elementos estão em faixas, pode-se manipulá-los, mas não é eficaz.
- b) Intervalo de solidificação: as ligas metálicas que não possuem composição eutética apresentam uma solidificação extensiva, características de longos intervalos de solidificação, onde acaba se formando uma pasta dificultando o movimento do líquido - com isso, acaba sendo necessário, uma maior pressão metalostática para que o metal líquido vença essa barreira formada pelas estruturas dendríticas. Essa zona pastosa seria equivalente a um filtro. Pode-se observar isto na figura 3.4 (MÜLLER, 2002).

Figura 3.4 Tipo de solidificação para ligas a) com baixo intervalo de solidificação b) com grande intervalo de solidificação.



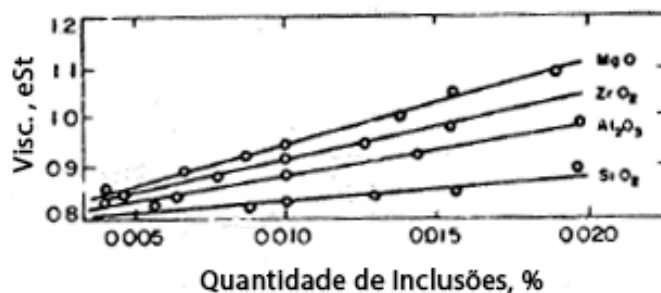
Fonte: Adaptado de MÜLLER, 2002.

- c) Temperatura de vazamento: a temperatura de vazamento, dentre todos esses fatores, é o mais fácil de alterar, pois não existe nada que impeça de ser cambiado. No entanto, quando é alterada, mexe-se em todo o equilíbrio termodinâmico e suas condições. Resumidamente, a temperatura de vazamento é a regente da fluidez do material quando está sendo vazado -

então, quando se utiliza uma temperatura muito alta, aumenta-se a fluidez, ao passo que aumenta também o consumo energético e dos refratários, além de incorporar uma maior quantidade de gases; ao trabalhar com temperaturas baixas, seríamos impedidos devido à baixa fluidez, possibilitando assim o não preenchimento do molde e ainda a ocorrência de solda fria (FINARDI e GUEDES, 1982; AHMAD et. al, 2013).

- d) Presença e quantidade de inclusões: quando um material líquido apresenta quantidades consideráveis de partículas sólidas, o mesmo aumenta sua viscosidade, já que estes trabalhariam como barreiras reduzindo a energia cinética do fluido, conforme pode ser visto na figura 3.5. Ademais, conforme ocorre a solidificação e a frente de solidificação controlada pelas dendritas, essas partículas podem se aglomerar no espaço interdendrítico, impedindo a passagem do metal líquido (FINARDI e GUEDES, 1982).

Figura 3.5 Influência da quantidade de inclusões na viscosidade.



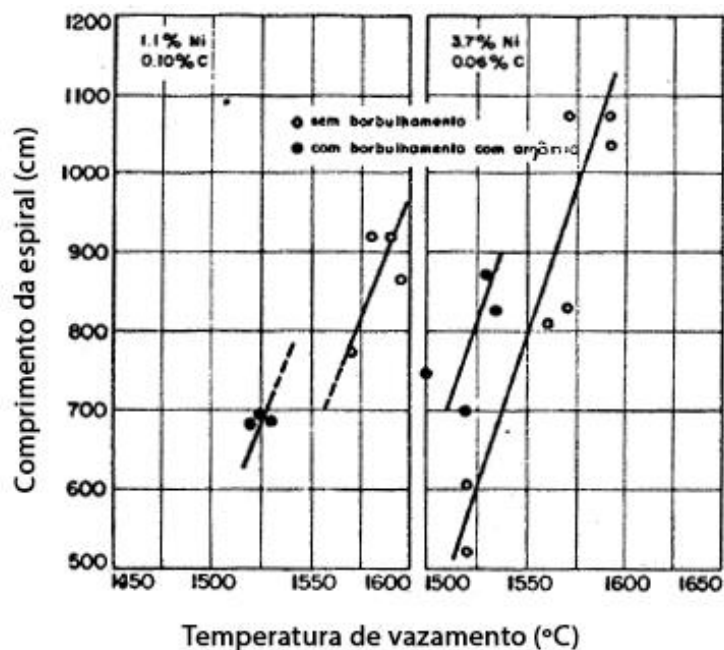
Fonte: ROTONDARO e JARDIM, 1984.

- e) Desoxidante e escória de proteção: ambos estão relacionados ao item anterior, pois o produto resultante da oxidação consiste em partículas inclusionárias dentro do banho metálico, diminuindo assim a fluidez do material; já a escória protetiva, também conhecida como pó de proteção, serve para proteger contra a reoxidação do banho metálico; no entanto, caso seja mal distribuído, ele pode acarretar a geração de partículas exógenas, produzindo o mesmo efeito já citado na fluidez (FINARDI e GUEDES, 1982).
- f) Tempo de vazamento: é o tempo demandado para que o molde seja preenchido pelo material fundido. Está intimamente relacionado a fluidez, pois quanto mais fluido o material for, menor será esse tempo. É possível

manipular essa variável conforme seja interesse do projetista/engenharia, dependendo da peça a ser produzida (FINARDI e GUEDES, 1982).

- g) Altura de vazamento: é a distância entre o funil do molde e o bocal da panela de vazamento, estando fortemente correlacionada, com a pressão metalostática. Vale lembrar que não se tem como alterar demasiadamente essa altura por medidas de segurança.
- h) Uso de gases inertes: essa é uma ferramenta utilizada para alguns tipos de aços na fundição devido ao seu custo; no entanto, no mercado siderúrgico já está muito mais difundido. A sua utilização tem como princípio a injeção de um gás inerte, normalmente o Argônio, para que ele arraste/flote as partículas inclusionárias e possíveis gases que estejam no banho, aumentando a fluidez do material, conforme pode ser visto na figura 2.6. Essa seria a ferramenta para solucionar os problemas acarretados da letra “d” e “e” (AMERICAN SOCIETY FOR METALS,1988; BALDAM e VIEIRA, 2014; FINARDI e GUEDES, 1982).

Figura 3.6 Influência da injeção de argônio com a fluidez.



Fonte: ROTONDARO e JARDIM, 1984.

Como fica evidenciado nos itens já citados, todos eles de alguma forma estão vinculados a fluidez do material; logo, pode-se afirmar que esta é uma das características

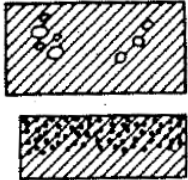
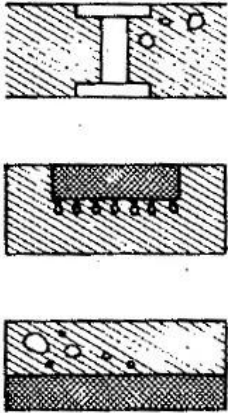


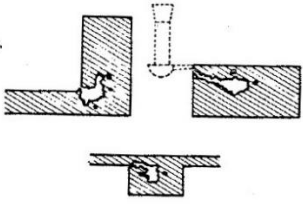
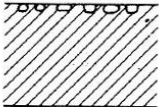
mais importantes do metal líquido para a fundição, já que impacta nas propriedades, defeitos, entre outros. Sendo assim, a fluidez é a capacidade de um material fundido fluir adequadamente dentro do molde e preencher seus detalhes perfeitamente (KONDIC, 1972). Essa definição está de acordo com todas as referências utilizadas, onde é citado o termo fluidez. Logo, o controle da fluidez é extremamente importante para que se gere peças sãs e conformes por fundição; no entanto, também fica claro que apenas algumas das variáveis que influenciam na fluidez podem ser mexidas respeitando as normatizações (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1988; BALDAM e VIEIRA, 2014; ABREU e FONSECA, 2003; BATTEZZATI e GREER, 1982). Assim, justifica-se o trabalho focado na temperatura de vazamento e fluidez na geração de defeitos de solidificação.

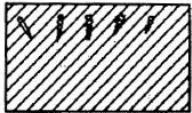

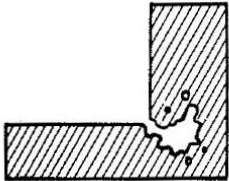


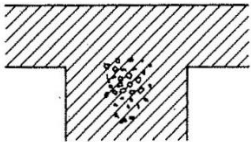
3.4 Defeitos de fundição

A diferença entre a produção de uma peça por fundição e por conformação mecânica, por exemplo forjamento, consiste no custo e na qualidade interna da peça, onde o primeiro usualmente apresenta algum tipo de descontinuidade dentro da peça, como vazios ao passo que o segundo, por trabalhar com matérias-primas provenientes das siderúrgicas, utilizam um material completamente são para realizar a conformação mecânica. Isto não significa que a fundição não possa apresentar um produto sem descontinuidades; no entanto, o controle de processo é bem mais complexo e por isso acaba-se trabalhando com critérios de aceitação da peça.

Todos os setores de uma fundição podem ser responsáveis pela geração de defeitos. Alguns podem ser mais recorrentes e outros podem ser mais críticos e por isso existe um setor responsável por analisar e conferir se a peça tem de ser retrabalhada, refugada ou se está aprovada pelo chamado de Controle de Qualidade. Este tem como seu papel fundamental identificar os problemas e defeitos, corrigi-los e, em um segundo momento, buscar a justificativa do porquê deste defeito ter surgido e sua solução para que ele não ocorra futuramente. A seguir segue a tabela 3.4, com alguns tipos de defeitos e posteriormente serão explanado os defeitos vinculados com a solidificação que foram julgados importante para o desenvolvimento do trabalho.

Tabela 3.4 Defeitos de solidificação

Defeitos internos			
B 111	Cavidades arredondadas e lisas, diferentes tamanhos e espalhadas por todo o fundido.	Bolha de gás	
B 112	Mesmo do B 111, com a diferença de que estão localizadas na vizinhança de partes metálicas.	Bolha de gás próximas a insertos, resfriadores, outros	
B 113	Mesma situação do B 111, mas é acompanhado das inclusões.	Bolha de escória	
B 121	Tamanhos diferentes, espalhadas ou isoladas em qualquer posição do fundido. Apresenta a parede da porosidade brilhante.	Bolha de gases superficial ou sub-superficial	
B 122	São poros que ocorrem quando a peça apresenta angulações. Muitas vezes atingem alta profundidade.	Bolha de canto	
B 123	Finos poros espalhados pela superfície da peça, podendo atingir grandes áreas.	Bolha de gás superficial	

B 124	São cavidades estreitas no formato de fissuras que usualmente são descobertas após a usinagem.	Rechupe internos dispersos	
B 211	Em formato de funil, são defeitos que se iniciam na superfície e penetram pra dentro da peça. Apresenta a parede com marcas dendríticas	Rechupe superficial	
B 212	São rechupe que se localizam nas angulações da peça.	Rechupe de canto	
B 213	Defeito proveniente do macho.	Chupagem ocorrida pelo macho	
B 221	Defeito sem formato certo e normalmente com as paredes dendríticas.	Rechupe cego	
B 311	Poros espalhados por toda a peça apresentando a parede "esponjosa" devido as marcas das dendritas.	Macros e microrechupes	

Fonte: AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY, 1999.

3.4.1 Rechupe

O rechupe, ou ponto quente, é considerado um defeito vinculado a contração que o metal líquido sofre na passagem do estado líquido para sólido. Isso ocorre quando inicia-se a solidificação nas paredes do molde, formando a primeira e fina camada de material sólido, juntamente quando começa a contração do material e, com isso, é necessário um canal de alimentação adequado para que a pressão continue forte o suficiente para alimentar a peça (COLPAERT, 2008).

Este defeito pode ser fruto de setores diversos dentro da fundição. O mecanismo de solução é o deslocamento deste para fora da peça através da utilização de massalotes, o tornando a última parte a ser solidificada e, por consequência o local em que estará o rechupe. Caso o projeto já apresente massalotes, o problema estará vinculado a capacidade de alimentação deste para com a peça e devido a isto pode ser necessário a utilização de um massalote com maiores dimensões ou será necessário adicionar mais massalotes (AMERICA FOUNDRY SOCIETY, 1974).

3.4.2 Gases

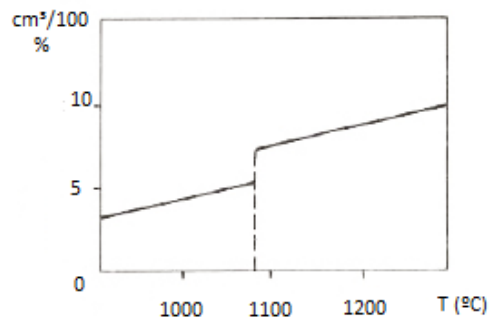
Existem porosidades oriundas da geração de gases endógenas – gases dissolvidos pela reação do banho com a atmosfera – e exógena, proveniente do gás retido mecanicamente ou de reações com o molde e/ou machos. Esse defeito pode estar disperso por toda a peça; no entanto, usualmente, encontra-se na última região a se solidificar.

O mecanismo que explica esse fenômeno está correlacionado com a termodinâmica, pois conforme aumenta-se a temperatura do banho, aumenta-se a porção de gases que é incorporado ao banho e, por consequência, a geração desse defeito. Então quando inicia-se a solidificação, esses gases que foram solubilizados por diferença de pressão se desprendem do metal supersaturado, formando assim o vazio (BALDAM e VIEIRA, 2014).

O procedimento utilizado para a redução e/ou eliminação desses defeitos é a desoxidação bem realizada, utilizando ferro-zircônio combinado com alumínio para evitar que se forme os nitretos de alumínio (NAI), que são prejudiciais ao aço. Ademais, o borbulhamento de gás inerte antes do vazamento é uma técnica utilizada em conjunto com o controle de temperatura. Este deve ser realizado de maneira adequada a fim de que se evite uma grande incorporação de gases no banho, mas que seja mantido uma boa fluidez do material (COLPAERT, 2008).

No gráfico da figura 3.7, pode ser visto a influência da temperatura na dissolução do gás hidrogênio na elaboração da carga de uma liga de cobre. Esse comportamento é análogo para ligas ferro-carbono para outros gases, como oxigênio, nitrogênio, entre outros que podem surgir no processamento da carga.

Figura 3.7 Quantidade de Hidrogênio absorvido com a temperatura

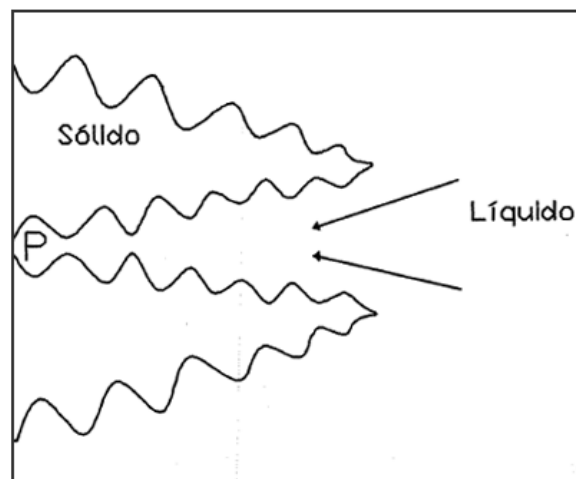


Fonte: SIEVERTS, 1977.

3.4.3 Microporosidades

Estas estão normalmente vinculadas ao intervalo de solidificação da liga, pois se localizam no espaço interdendrítico quando inicia-se a zona pastosa e o projeto foi mal desenvolvido, e, por consequência, não apresenta pressão metalostática suficiente para avançar contra o crescimento das dendritas, conforme pode ser visto na figura 3.8. (COLPAERT, 2008)

Figura 3.8 Formação do microporos na região interdendrítica



Fonte: COLPAERT, 2008.

Como solução para esse problema, é necessário controlar o resfriamento a fim de evitar um crescimento exagerado das dendritas, através de resfriadores ou similares.

Outra alternativa é desenvolver um projeto mais adequado já considerando essa dificuldade na alimentação. Pode-se dizer para alterar o intervalo de solidificação da liga ou alterando a liga a ser utilizando ou manipulando a composição química dentro das faixas permitidas, mas dependendo da liga pode não ser tão eficaz (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1988; MULLER, 2002; CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA, 2016).

3.4.4 Outros

Além dos supracitados, existem ainda alguns defeitos vinculados a temperatura de vazamento e a fluidez do material, tais como enchimento completo, junta fria ou solda frita, gota fria, rabo de rato, fusão da areia, escama, inclusões, entre outros. Por isso, o controle desse fator é de extrema importância para o controle de defeitos e a sanidade das peças.

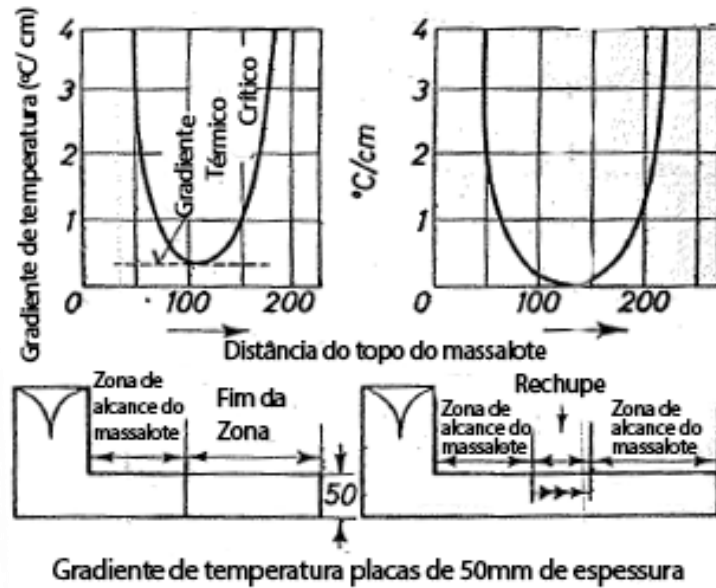
3.5 Projeto

Esta é a primeira etapa para a produção de um fundido, pois é onde será dimensionado o sistema de alimentação e possíveis ferramentas a fim de minimizar a geração de defeitos provindos do projeto. Logo, é responsável pelo dimensionamento do massalote e distância alimentada, critério térmico e volumétrico (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1988; ABREU e FONSECA, 2003).

O massalote é um depósito de metal líquido, que alimentará a peça após iniciar o seu processo de solidificação. No caso, este será a última parte da peça a se solidificar deslocando todos os possíveis defeitos de contração para si, evitando que os mesmos se localizem na peça. É válido recordar ser necessário satisfazer alguns requisitos, como estar posicionado corretamente na região mais quente da peça, conter volume suficiente para compensar a contração da peça, e o seu tempo de solidificação tem de ser superior ao tempo da última região da peça a se solidificar (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1988; ABREU e FONSECA, 2003; WLODAWER, 1966).

A partir desses critérios, e conhecendo a peça, a Engenharia determinará qual o massalote a ser escolhido e suas dimensões, levando em consideração também o caminho máximo que este alimentará. Caso seja mal planejado, o rechupe se encontrará entre dois massalotes, produzindo assim uma peça que necessitará ser retrabalhada. Isto pode ser visto na figura 3.9 (WLODAWER, 1966).

Figura 3.9 Distância de alimentação do massalote



Fonte: Adaptado de R. WLODAWER, 1966.

Para a realização desses cálculos é necessário conhecer a regra de Chvorinov (1940) e o conceito de módulo apresentado posteriormente por Wlodawer (1966), que é uma relação entre volume e a área de resfriamento, conforme a equação 1. A partir disto, pode-se dividir a peça em vários módulos para facilitar a manipulação matemática e, a partir desse resultado, dimensionar o sistema de alimentação, canais e massalotes (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1988; WLODAWER, 1966).

$$M_p = V/A \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

M_p = Módulo da peça (cm);

V = Volume do metal líquido (cm³)

A = Área de troca de calor (cm²)

O critério térmico indica um fator de segurança para o tempo de solidificação dos massalotes perante o da peça, com o propósito de garantir a alimentação adequada. A partir da identificação do ponto quente na peça, o massalote é disposto naquela seção com a dimensão adequada, visando atender à solicitação que a peça necessite. Já o critério volumétrico indica ser necessário que o massalote disponibilize um volume mínimo para

atender a soma da contração volumétrica da peça e de si próprio. Esse cálculo pode ser realizado a partir da equação 2 (WLODAWER, 1966; ALBERTIN, E. et al., 2010).

$$V_{cavt} = V_m (14-Si)/S \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

V_{cavt} = Volume das cavidades totais (cm³)

V_m = Volume do massalote (cm³)

Si = Contração líquida

S = Contração total.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho está dividido em três partes, onde a primeira busca identificar o problema a ser solucionado através do corte seccional da peça a ser estudada, será realizada uma simulação computacional da peça com o software de simulação para fundição Click2Cast e serão produzidos corpos de prova e analisados no microscópio ótico. Os resultados serão coletados de um modelo físico em espiral, objetivando a qualificação da fluidez do material estudado conforme a temperatura de vazamento é alterada e um modelo em escada que objetivará a identificação da relação da espessura com a quantidade de defeitos. Por fim, a produção do prato pião através de um processo de fusão e vazamento mais eficiente.

4.1 Materiais

O objeto de estudo consiste em uma peça fundida em aço AISI 1030, chamada prato pião. Essa é uma peça do setor ferroviário que tem o papel de suporte para a caixa do vagão. O modelo para a fabricação do molde foi feito em madeira, bipartido e emplacado, utilizando ângulos de saída e tinta desmoldante. Foram produzidos dois moldes para o trabalho, em que um produzirá a peça antes das alterações e o outro depois das modificações.

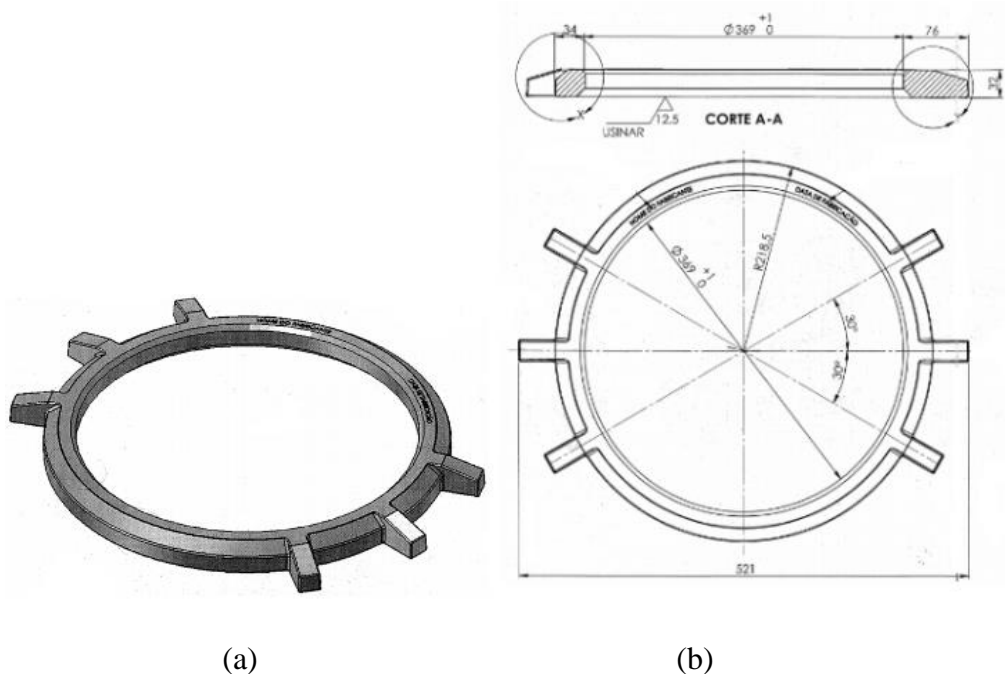
O molde foi produzido em areia curada, utilizando aproximadamente, 85 kg de areia recuperada do processo e 15 kg de areia nova. Para que o molde apresente as propriedades necessárias, foi utilizado 1 kg de resina 1 (1% da massa de areia), 500 g de resina 2 (0,5% da massa) e 100 g de catalisador (1% da massa da resina 1). A areia é misturada e disposta no molde através de máquinas para que seja compactada manualmente pelo operador. Foi utilizado uma caixa de moldagem com as seguintes dimensões: (654x560) h 102x84 mm. Depois, o molde recebeu uma camada de tinta refratária (silicato de alumínio) aplicado pelo processo de lavagem com o propósito de que se evite problemas relacionados com a areia, como sinterização da mesma e para melhorar o acabamento superficial da peça.

Para a composição da carga foi necessário 1150 kg de sucata de aço (AISI 1005, 1010, 1020) em conjunto com o retorno de aço (AISI 1030, 1045), para a composição da carga ir ao forno e produzir o metal fundido. Também foram utilizados 3,2 kg de Fe-Zr e 500g de Al, ambos para a desoxidação do banho. Além disso, adicionou-se 2,5 kg de Si

em pedras, 6 kg de Fe-Mn, 3,2kg de Ca-Si e 600g de grafite. E foi adicionado pó de proteção na parte superior da panela para a proteção superficial do banho, evitando que o material reoxide ao longo da corrida.

Para a desmoldagem foi necessário aguardar aproximadamente 3 horas para garantir que o material já esteja sólido. A retirada dos canais foi realizado através da quebra por martelada. Na figura 4.1 e 4.2, é possível ver a peça de estudo e as suas vistas.

Figura 4.1 Desenho e dimensões da peça prato pião. a) Vista de perspectiva. b) Vista de topo e corte. Dimensões em mm.



Para a geração dos resultados foram elaborados dois corpos de prova: um em escada e um espiral.

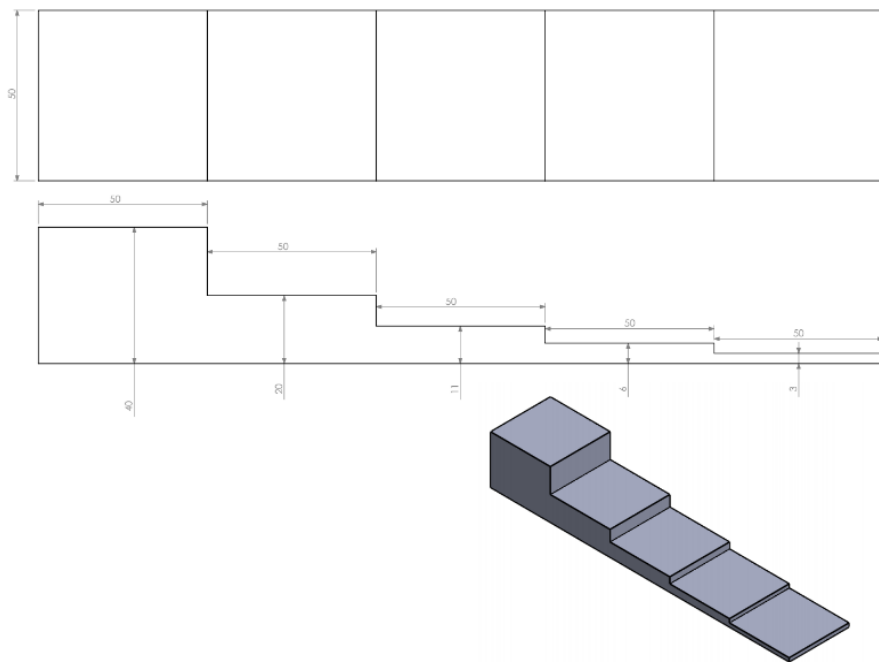
O primeiro foi produzido em madeira, emplacado, inteiriço e também foi colocado um pequeno ângulo de saída para facilitar a retirada do modelo do molde. Quanto a parte de modelo, a única diferença entre eles foi a utilização dos canais de alimentação do espiral de maneira solta devido a sua complexidade. O primeiro utilizou uma placa de 300x450 mm e foi colocado dois modelos na mesma placa.

Para ambos, foi utilizado areia curada com as mesmas relações de resinas, catalisador e areia já citado anteriormente. Foi utilizado aproximadamente 35 kg e 50 kg

de areia por molde, respectivamente. Ambos foram pintados com a mesma tinta já utilizada para a peça e não apresentam luvas nem respiros.

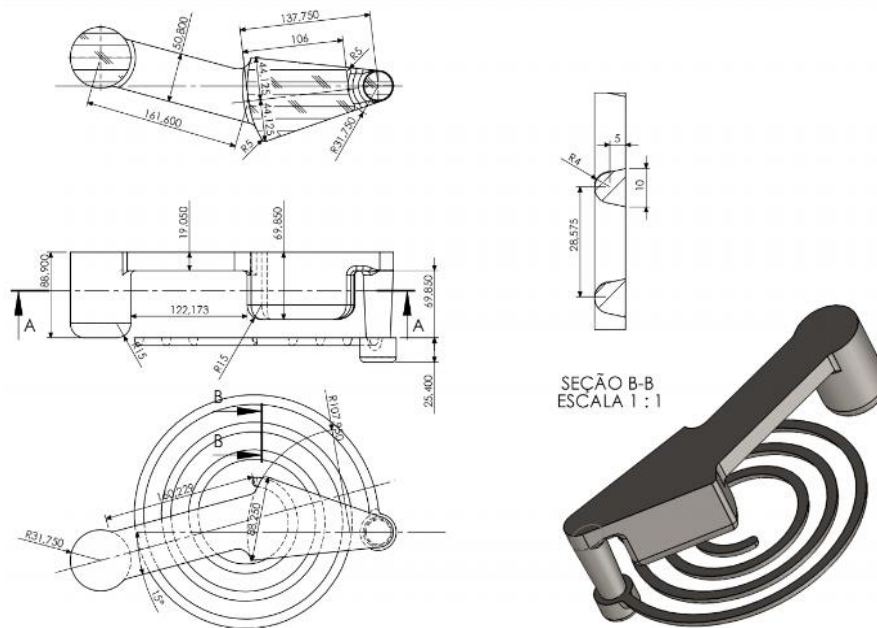
Foram produzidos 6 CP's em escada e 3 em espiral, Figuras 3.2 e 3.3, para que se possa variar a temperatura de vazamento de acordo com a faixa de temperatura utilizada para o prato pião; logo, a menor temperatura será 1570, a intermediária 1580 e a maior temperatura será 1590 °C. O objetivo desses corpos de prova é poder correlacionar a temperatura de vazamento com a fluidez do material e visa estabelecer uma relação entre a geração de poros devido a gases conforme variamos a temperatura e a espessura da peça.

Figura 4.2 Modelo em escada e suas vistas. Dimensões em mm.



Fonte: Adaptado de SCHEIB e WEISSKOPF, 2008. Adaptado de MOREIRA, 2008.

Figura 4.3 Modelo em espiral e suas vistas. Dimensões em mm.



Fonte: Adaptado de CAMPBELL, 2003.

Os modelos foram produzidos em madeira, pois não foi apresentada a necessidade de ser feito em outro material, já que foram lotes pequenos, permitindo assim a utilização da matéria-prima mais barata é compensatória. Quanto ao emplacamento serviu para facilitar o manuseio e a moldagem do mesmo.

As ferramentas utilizadas para a produção dos resultados do trabalho foram um pirômetro ótico, um espectrômetro, microscópio ótico e o software de simulação para fundição da Click2Cast.

O primeiro foi utilizado em todas as corridas a fim de verificar que as temperaturas no forno e na panela estejam de acordo e o modelo utilizado é o Inditemp da Ecil, o qual apresenta uma faixa de medição de 1000 a 1700° C; a temperatura de vazamento será 1570, 1580 e 1590° C para cada molde. O segundo serviu para conferir a composição química da fornada e, a partir do que é detectado, realizar a correção da carga.

A parte mais importante do trabalho está na análise por microscopia ótica, pois a partir dos resultados gerados por eles as medidas corretivas serão abordadas. A partir disto, tem-se a qualificação do defeito, diferenciando rechupe de bolha de gás. O microscópio ótico utilizado foi o SpectroLab de emissão ótica com vinte quatro canais. Com a análise metalográfica já será possível identificar se é rechupe ou bolha de gás

através da visualização de suas paredes: caso seja rugosa é rechupe devido a estrutura das dendritas e, caso a parede seja lisa, o problema é proveniente da geração de gases. (FUOCO et. Al, 2007)

4.2 Métodos

A metodologia experimental utilizada no projeto para a identificação dos defeitos consistiu na realização do corte transversal do prato do pião, na simulação computacional via Click2Cast, análises metalográficas e ensaio de fluidez.

O meio de aquecimento foi o forno indutivo (marca Inductotherm), com o cadinho de 1650 kg. A faixa de temperatura definida para essa peça foi entre 1570 a 1590 °C e a panela utilizada apresenta o vazamento por baixo – válvula -, com o controle via pistão e o diâmetro selecionado para o bocal foi de 35 mm.

Foram utilizadas 6 luvas domadas estranguladas 6x8 da marca Comil para garantir que o prato pião seja alimentada de maneira correta, evitando-se assim a formação de rechupes. Também foram gerados 6 canais de saída dos gases dispersos pela peça para facilitar a fuga dos gases que podem ficar presos na peça gerando defeitos.

4.2.1 Corte

A realização do corte transversal da peça foi feito para localizar onde estão surgindo os defeitos e para que sejam geradas amostras a fim de que se possa observar no microscópio ótico e verificar qual é a falha encontrada e, a partir disso e em conjunto com outras experiências, buscar a solução do problema proposto.

Esses cortes foram realizados com serra elétrica para que fossem embutido para que, posteriormente, fosse feito a análise metalográfica.

4.2.2 Simulação computacional

Este servirá como mais uma ferramenta para confirmar que a peça está sendo alimentada corretamente e comprovando que os defeitos apresentado não são rechupes. Em conjunto com o corte e os cálculos de dimensionamento de canais, distância de alimentação dos massalotes, entre outros, será possível afirmar com segurança qual o defeito que está aparecendo na peça; a partir disso, tomar as devidas medidas corretivas.

4.2.3 Análises metalográficas

Para que se possa olhar a microestrutura da peça, buscando correlacionar com a espessura do corpo de prova e a taxa de extração de calor com a geração de defeitos oriundos da solidificação. Além disso, a análise do prato do pião irá nos comprovar que o defeito é porosidade proveniente de gases que ficaram “presos” no banho metálico através do estudo da parede do defeito, já que caso seja lisa, confirmará o que está sendo pensado e discutido.

Foi feito corte no prato pião na região onde os defeitos estão localizados e no corpo de prova em escada para que fossem embutidos. Após essa etapa, foi lixado em 220, 320, 400, 600 depois foi polido na politriz com alumina e, por fim, foi realizado o ataque com Nital 3%.

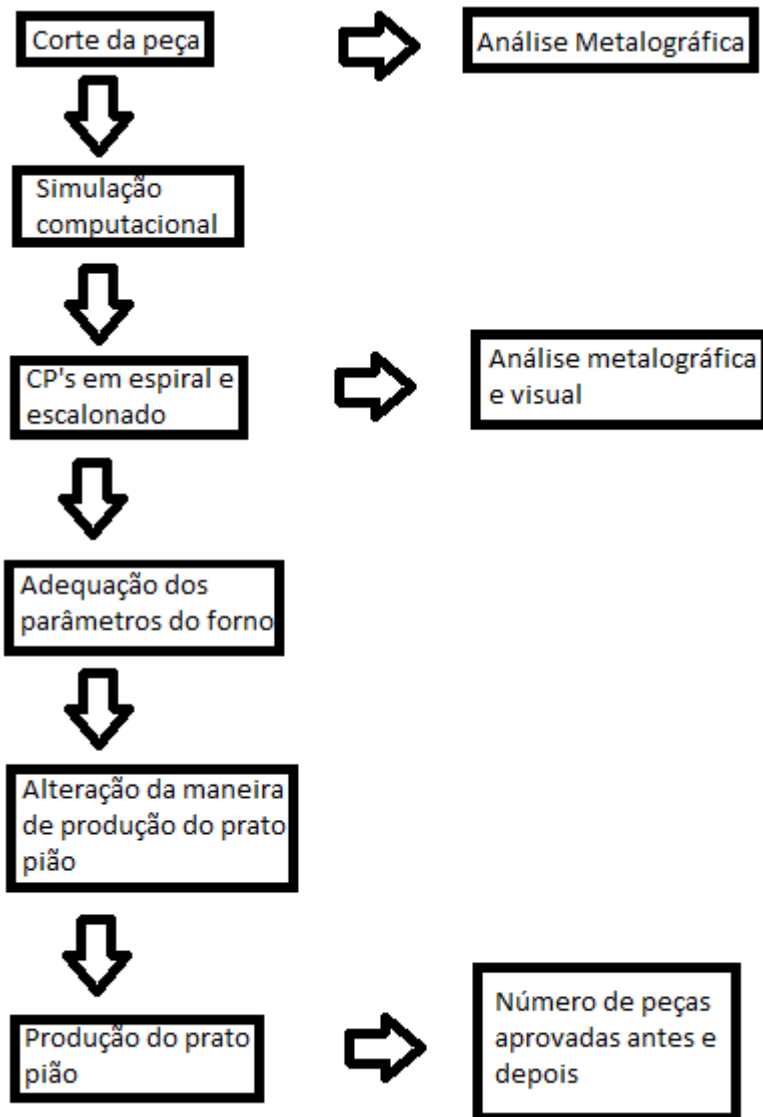
4.2.4 Ensaio de fluidez

Esse ensaio servirá para comprovar que quanto maior a temperatura de vazamento, maior a fluidez do material e, por consequência, maior a capacidade do banho de preencher cavidades e peças mais complexas. No entanto, conforme a temperatura aumenta, a quantidade de problemas também aumenta.

A análise desse ensaio foi feito visualmente, pois é de extrema facilidade a visualização da diferença do preenchimento da espiral conforme a temperatura é alterada.

. Então, para sintetizar a metodologia, será realizado o corte na região onde os defeitos estão surgindo e analisados em conjunto com a conferência de que os massalotes estão cumprindo seu papel perfeitamente. A seguir, será realizada a produção dos corpos de provas em escada e em espiral, em diferentes temperaturas para buscar uma correlação da temperatura de vazamento e da espessura com a geração de defeitos para a liga AISI 1030, e será feito o estudo desses resultados. Para finalizar essa pesquisa através dos resultados produzidos, serão realizadas as alterações no setor de vazamento para otimizar a produção do prato pião. Pode ser visto na figura 4.4 como será organizado a parte experimental do trabalho.

Figura 4.4 Fluxograma da metodologia.



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro resultado obtido no trabalho foi a composição química da liga que foi vazada e suas temperaturas. A primeira está de acordo com a AISI 1030, conforme pode ser visto na tabela 5.1, que nos apresenta o limite inferior e superior da quantidade de cada elemento e o resultado obtido no trabalho.

Tabela 5.1 Composição química da liga vazada em porcentagem:

	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Al	%Cu	%V	%W
% max.	0,34	0,60	0,90	0,035	0,035				0,07			
% obtido	0,311	0,504	0,817	0,0235	0,0102	0,0826	0,0073	0,0242	0,0437	0,0265	0,0028	0,0099
% min.	0,28	0,26	0,60									

A composição obtida está mais próxima do limite superior que do inferior e, pode ser obtido algumas informações através disto. Primeiramente, é um aço de baixo carbono; logo, apresenta propriedades mecânicas baixas. O silício presente deve fornecer um leve aumento dessas propriedades devido ao endurecimento por solução sólida na fase ferrítica.

A temperatura do forno antes da carga ser transferida para a panela era 1638°C e as temperaturas de vazamento foram de 1583±10°C, ou seja, diferença de 3° C para o que havia sido planejado e estipulado para o trabalho. O tempo de preenchimento do corpo de prova em escada foi de 5 s; já para o prato do pião, 6 s, como fica evidenciado na tabela 5.2. Devido a diferença de tamanho entre a peça e o CP, o lógico indicaria que a primeira apresentasse o maior tempo e isto, de fato, ocorre; no entanto, os tempos estão muito próximos devido a diferença de vazão utilizada entre elas.

Tabela 5.2 Temperaturas de vazamento e tempos de preenchimento da peça e do corpo de prova escalonado.

Parâmetro\Peça	Prato Pião	CP escalonado
Temperatura	1583° C	1583±10°C
Tempo de preenchimento	6 s	5 s

O peso do corpo de prova individual foi de 1,6 kg, apresentando ainda alguma pequena variação que não foi possível ser medida devido a deficiência da balança. Os canais de alimentação estavam pesando 4,4 kg; logo, o sistema inteiro pesou 6 kg com um rendimento metálico de aproximadamente 50%. A título de pesquisa, esse resultado não seria relevante, mas para o setor industrial é muito importante, já que se busca lucro e o máximo aproveitamento dos recursos. Já o peso do prato do pião ficou em torno de 13 kg, considerando o sobremetal utilizado para a usinagem, e seu rendimento metálico ficou muito similar ao do corpo de prova.

Através da análise visual foi possível identificar que em nenhuma temperatura o menor degrau (3 mm) foi preenchido plenamente e para a temperatura mais baixa também se apresentou problema no segundo (6 mm). Isso é resultado do processo produtivo adotado para o trabalho (fundição gravitacional), pois para espessuras abaixo de 10 mm é necessário realizar o vazamento sob pressão. Paralelamente a isso, foi possível visualizar a influência da temperatura no poder de preenchimento da peça; ou seja, quanto maior a temperatura de vazamento sob gravidade, maior será a fluidez do líquido e, por consequência, maior a capacidade de completar a cavidade do molde. Como mostra a figura 4.1, a peça da direita teve seu preenchimento comprometido, pois foi vazado com a menor temperatura do trabalho (1573°C); já o CP da esquerda apresentou o maior comprimento devido à alta temperatura e, por consequência, a alta fluidez.

Infelizmente, para a comprovação da influência da temperatura com a fluidez do material que seria feito com o modelo em espiral não foi possível ser realizado, pois surgiu um imprevisto. Apesar disso, a literatura é bem clara para explicar qual seria o comportamento do material fundido para esse tipo de experiência (RUBIO, PANZERA e NOGUEIRA, 2006; FINARDI e GUEDES, 1982). O preenchimento da espiral com a maior temperatura apresenta o maior comprimento e, por consequência, a maior fluidez do material. Além disso, através do ensaio com o modelo em escada, é possível visualizar

essa influência também, conforme pode ser visto na figura 5.1. Portanto, é possível afirmar que na grande maioria dos casos, o aço fundido apresenta maior fluidez quanto maior a temperatura. Isso vai ao encontro dos estudos já realizados por outros pesquisadores, como AJIBOLA et. al, 2005, AHMAD et. at, 2013.

Figura 5.1 Corpos de prova obtidos com temperaturas de vazamento de 1593° C, 1583° C, 1573° C, respectivamente da esquerda para a direita.



No vazamento de um dos corpos de prova – não registrado por figura-, ocorreu uma interrupção do operador em que ele reduziu a vazão e, devido a isto, foi possível observar uma situação não esperada: o preenchimento incompleto. Quando isto ocorreu, em conjunto com a extração de calor pelas paredes, fez com que a pressão exercida pelo líquido vazado não fosse suficiente para que o material já presente no interior do molde seguisse o seu caminho, gerando assim um corpo de prova não compatível com o que era esperado e o que já havia sido visto ao longo da experiência.

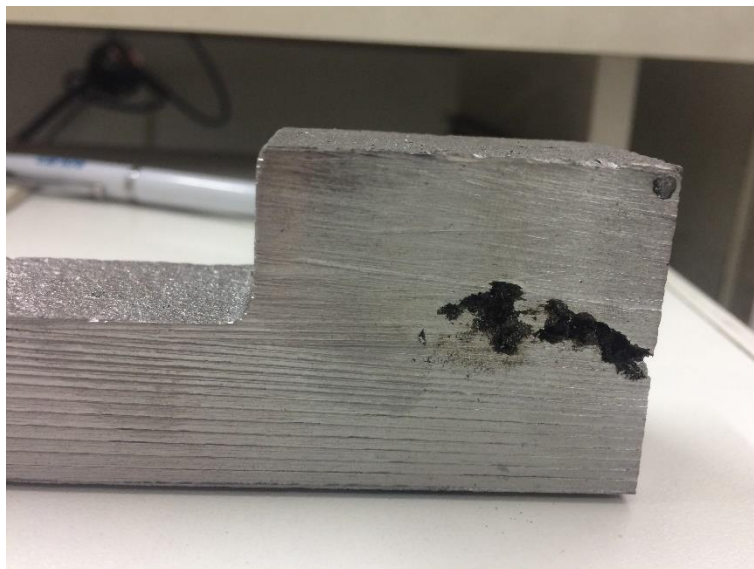
Foi feito um corte seccional no ponto da distância média entre as luvas e retirou-se uma amostra para análise. Nesta não foi verificado nenhum rechupe, mas algumas porosidades provenientes de gases. Isto acabou por provar que os cálculos de massalotagem e canais de alimentação, de acordo com Wlodawer (1966) estavam fornecendo como resultado dados condizentes com a prática; então, o conjunto dessas duas ferramentas nos indicaram que o projeto estava correto na prevenção de rechupes.

Para finalizar essa comprovação, foi feito a simulação computacional, que forneceu o perfil térmico da peça. Infelizmente, a imagem da simulação não pôde ser colocada no trabalho devido o sigilo da empresa. Apenas os resultados puderam ser aproveitados no trabalho.

Embora o sistema de alimentação do prato do pião não tenha apresentado nenhum problema quanto a quebra dos canais/luvas e rechupe, o corpo de prova em escada apresentou alguns problemas. Primeiramente, a remoção do sistema alimentador foi feita através de marteladas. Mesmo que tenha sido inserido um chanfro para facilitar essa retirada, houve uma certa dificuldade relatada pelo operador devido ao tamanho do canal. Além disso, devido a essas batidas para remoção, as espessuras mais finas, degraus menores, sofreram uma leve entorse. Caso fosse uma peça a ser comercializada, o sistema de corte deveria ser alterado para oxicorte ou readequar o projeto.

Além disso, foi possível identificar que para todos os degraus, o cálculo do módulo (WLODAWER, 1966) estava correto com exceção do canal em que estava a alimentação. Com isto, gerou-se rechupes grandes em todos os corpos de prova – como pode ser visto na figura 5.2, comprovados pela análise visual, já que foi possível ver as paredes rugosas e brilhantes (AFS, 1999). Uma possibilidade para o mal preenchimento estaria no chanfro criado para a quebra dos canais; mas como não serviu para o seu propósito, poderia ser reajustado.

Figura 5.2 Corpo de prova com macro-rechupe



Portanto, quanto ao sistema de alimentação do corpo de prova, seria necessário a sua modificação. Uma opção simples seria a retirada através de oxicorte; no entanto, não eliminaria os rechupes e tampouco aumentaria o rendimento metálico. A melhor opção seria redimensionar os canais, reduzindo-os para aumentar o rendimento metalúrgico e, paralelamente, adicionar um pequeno massalote no maior degrau atendendo ao critério volumétrico e térmico.

5.1 Análises metalográficas

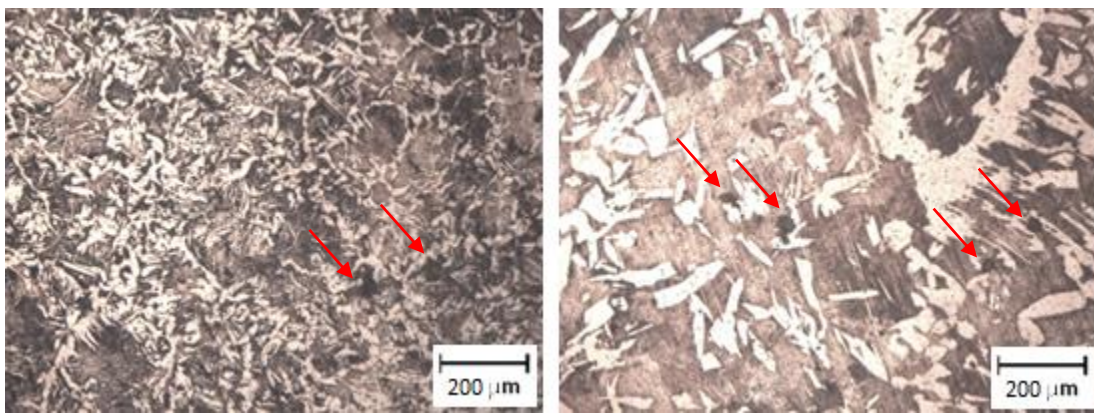
A partir da visualização da microestrutura do material do corpo de prova, foi possível identificar uma série de informações relacionadas a temperaturas de vazamento e espessuras com a geração de defeitos. Primeiramente, foi visto a influência da espessura, iniciando pela menor – 3 mm – e crescendo gradativamente até atingir a espessura máxima de 40 mm. Segundo WLODAWER, 1966, o menor volume é alimentado pelo maior independente de quantas variações existem na peça; logo, a espessura de 11 mm alimentava a de 6 que alimentava a de 3 mm e, por isso, foi possível visualizar o crescimento de defeitos de solidificação, principalmente bolha de gases, conforme a espessura aumentava. É importante ressaltar que todas as amostras foram retiradas de camadas sub-superficiais das peças, pois é a região mais propensa, onde estarão os poros por bolha de gás.

Essas porosidades são originárias do processo, podendo ser da carga metálica, da reação na interface molde-banho líquido, a tinta não estava bem seca. Como não existia saída de gases no molde do corpo de prova, toda a fuga deveria ser pelo molde através de uma boa permeabilidade; fato que não ocorreu. No trabalho apresentado, foram minimizadas todas as fontes de porosidades ao longo do processo, deixando apenas a proveniente do setor que interessava; portanto, as bolhas do corpo de prova em sua grande maioria, vieram da carga metálica. A seguir, na figura 5.3, pode ser visto as microestruturas resultantes e os defeitos que ocorreram ao longo do CP.

Em relação as fases e suas quantidades, foi encontrado ferrita – região clara nas imagens - precipitada em uma matriz de perlita, matriz escura, com a tendência de se ter mais da segunda fase. Ainda tem-se uma região intermediária, de coloração amarronzada, onde as duas fases coexistem. Na figura 5.3a, observa-se uma microestrutura diferente das demais, isto deve-se a combinação da temperatura alta (1593° C) e a pequena

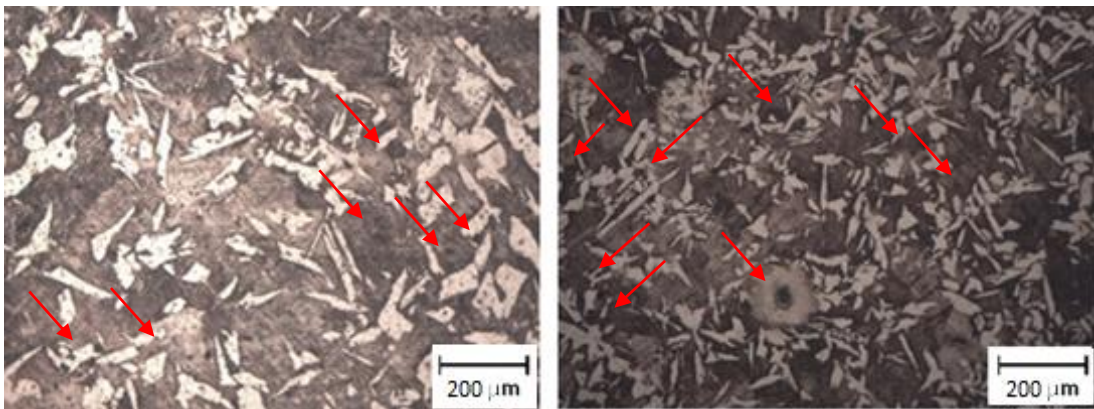
espessura, gerando assim uma alta taxa de resfriamento. Por fim, o interesse do trabalho consiste na visualização e análise quantitativa dos pontos pretos de paredes lisas, que são onde estavam as bolhas de gases. Vale recordar que todas as metalografias no trabalho são do material no estado bruto de fusão.

Figura 5.3 Metalografia do corpo de prova. a) Espessura de 3 mm com aumento de 50x. b) Espessura de 6 mm com aumento de 100x. c) Espessura de 11 mm com aumento de 100x. d) Espessura de 20 mm com aumento de 100x. e) Espessura de 40 mm com aumento de 100x.



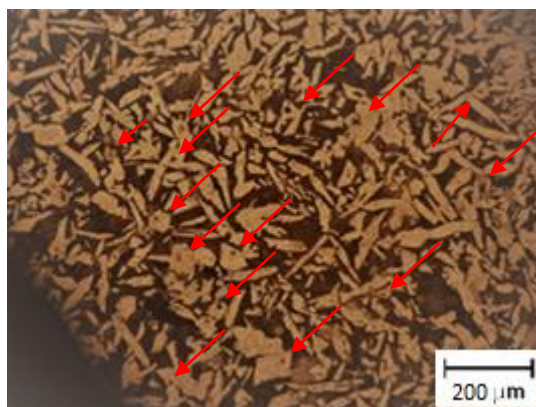
(a)

(b)



(c)

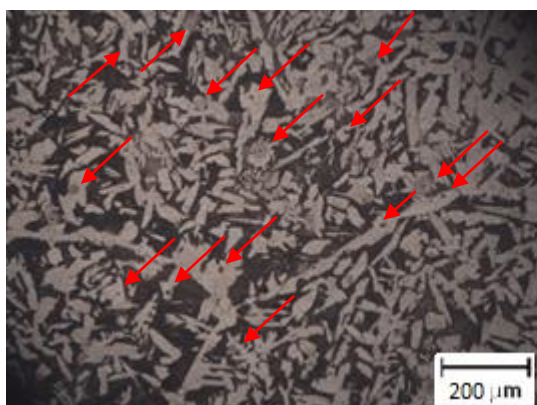
(d)



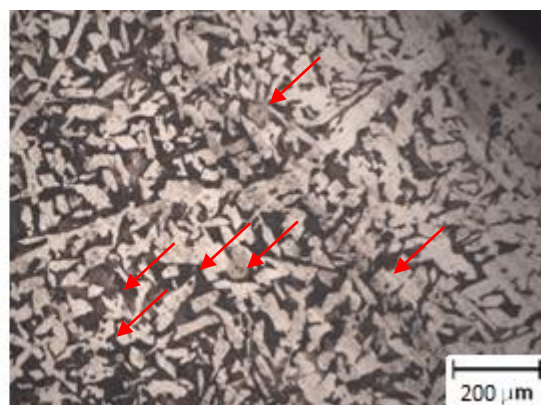
(e)

Esse aumento da quantidade bolha de gases e microrechupes ao longo do crescimento da espessura era esperado porque, conforme ocorre a solidificação e por consequência a redução da temperatura, as bolhas vão se direcionando para o local mais quente. Isto é análogo ao aumento da presença de porosidades conforme a temperatura cresce. Na figura 5.4, pode ser visualizada a microestrutura da última região a se solidificar para diferentes temperaturas. Através dos resultados produzidos, foi possível identificar que o corpo de prova produzido com a maior temperatura de vazamento apresentou mais porosidade; para uma das situações também se teve uma porosidade maior devido ao coalescimento de microbolhas. Isso ocorre porque a espessura de 40 mm é a última parte da peça a se solidificar.

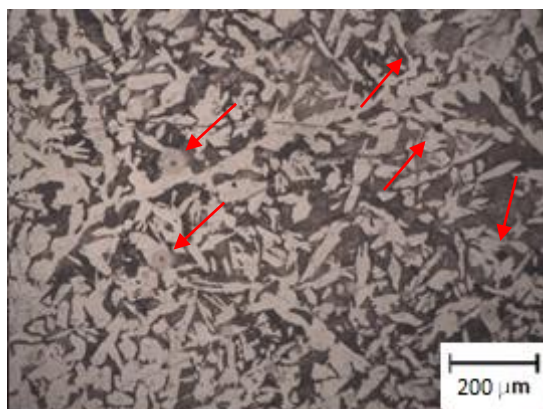
Figura 5.4 Metalografia do corpo de prova na espessura de 40 mm com aumento de 100x. Temperatura de vazamento de (a) 1593°C, (b) 1583°C e (c) 1573°C.



(a)



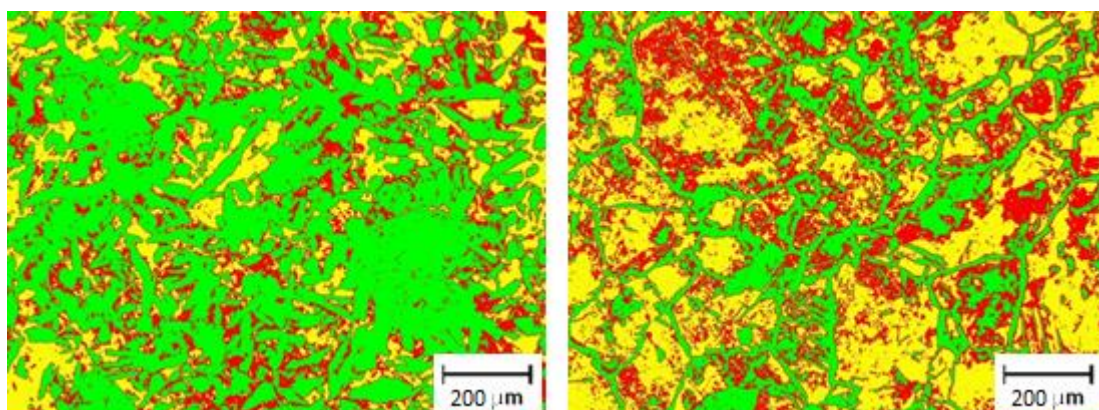
(b)



(c)

Através do software de análise de imagens, foram quantificadas as fases presentes na microestrutura e quantificadas. Para 1593° C, foi encontrado uma maior quantidade de ferrita para a espessura de 40 mm da peça devido a uma menor taxa de extração de calor, pois como a temperatura era a maior, isso favoreceu a difusão do carbono, conforme pode ser visto na figura 5.5a, onde o verde representa a ferrita e o amarelo e vermelho, a perlita. Foi possível verificar que a quantidade de ferrita cresce concomitantemente com a espessura da peça e, por essa, razão a microestrutura típica de um aço AISI 1030 (aproximadamente 65% ferrita e 35% de perlita) foi vista para o maior degrau; ao passo que a menor espessura apresentou uma maior quantidade de perlita, como pode ser visto na figura 5.5b. Esse comportamento deve-se a maior área superficial em comparação com o volume e, por isso, a taxa de extração de calor do material é máxima. O resultado encontrado foi de aproximadamente 30% de ferrita e 70% de perlita. Esses resultados estão coerentes com a literatura segundo o livro Heat Treatment da American Society for Metallurgy (1964).

Figura 5.5 Quantificação de fases no AISI 1030 bruto de fusão a) para espessura de 40 mm b) para espessura de 3 mm



(a)

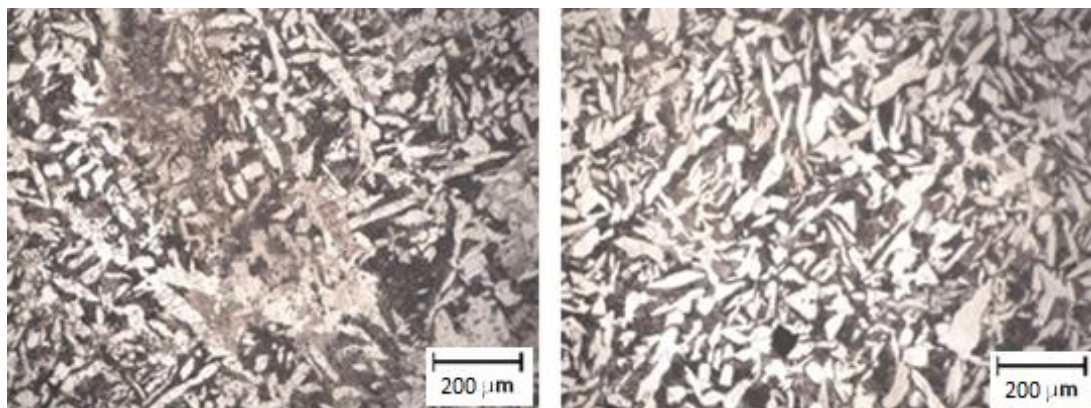
(b)

A partir dos resultados obtidos através do corpo de prova em escada, foi possível encontrar uma relação clara entre a quantidade de porosidades na peça e a maior temperatura de vazamento. Além disso, também ficou claro a relação da fração de descontinuidades volumétricas e a variação da espessura, não especificando como seria o comportamento desse crescimento. Com esses resultados, foi feita uma redução de 10° C na temperatura de vazamento da peça, que justificou o trabalho com a proposta de reduzir os defeitos encontrados. A temperatura não foi mais reduzida para que não ocorresse outros tipos de defeitos, mas pode ser um estudo novo a ser realizado.

A figura 5.6 mostra a imagem da microestrutura interna da peça e de sua região sub-superficial antes da alteração (figura 5.6a) e depois da alteração da temperatura de vazamento (figura 5.6c). Nela, pode ser vista a estrutura perlítica com aproximadamente 67% de ferrita e 33% de perlita com vários pontos escuros dispersos na matriz. Esses pontos são defeitos, podendo ser porosidade e inclusões não-metálicas, as quais também reduzem as propriedades mecânicas do material e a fluidez da liga. Nota-se que para a região próxima à superfície encontra-se uma maior quantidade de defeitos já que o movimento das bolhas de gás tende a se encontrar nessa região porque as mesmas estão tentando escapar do aço fundido. Já para a região interna, foram encontrados menos defeitos, mostrando uma região mais sã (figura 5.6b e 5.6d) quando comparada com a região sub-superficial.

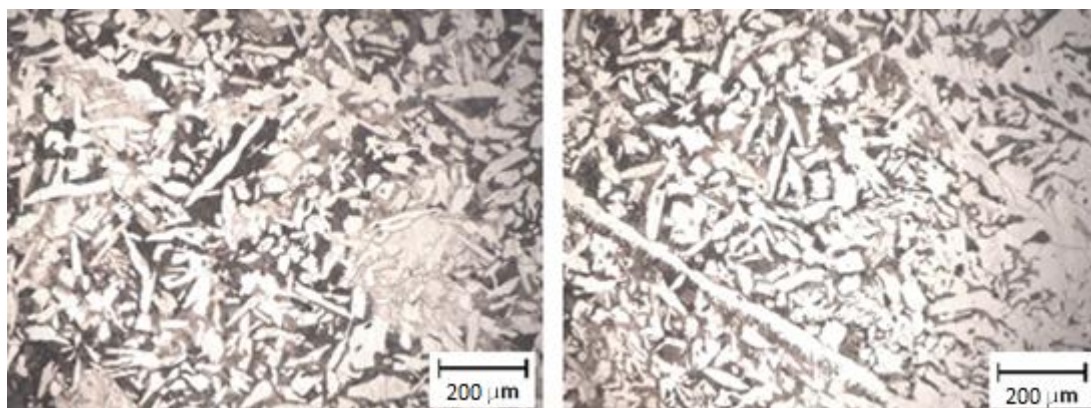
Caso comparemos a figura 5.6a e 5.6c, fica bem claro que para a primeira aparece inúmeros pontos escuros dispersos e para a segunda imagem eles quase não são encontrados. Isso evidencia a tendência de que para a maior temperatura, maior a quantidade de poros.

Figura 5.6 Metalografia da peça com aumento de 100x. a) Região sub-superficial antes da alteração. b) Núcleo da peça antes da alteração. c) Região sub-superficial pós alteração. d) Núcleo pós alteração.



(a)

(b)



(c)

(d)

5 CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho foi alcançado em sua plenitude, pois foi confirmado que os defeitos que estavam afetando a sanidade da peça eram os gases provenientes do processo e, por consequência, era um defeito de processo. Caso tivessem sido encontrados rechupes, o trabalho teria atacado em outra frente – projeto. Foi possível realizar as alterações dos parâmetros estudados no processo produtivo e foi captável que, com a diminuição dessa temperatura, a peça que foi a motivação desse trabalho apresentou uma redução na quantidade de defeitos.

Foi possível confirmar a tendência que, quanto maior a temperatura de vazamento, maiores são as chances de ocorrência de porosidades proveniente dos gases que foram absorvidos no processamento do banho metálico. Concomitantemente, o estudo foi capaz de verificar uma tendência, que quanto mais espessa a peça, maior a probabilidade do surgimento de poros dispersos; ao passo que a espessura diminui, é também reduzido o aparecimento desse defeito de solidificação, muito comum no mundo industrial.

Algumas dificuldades se apresentaram no último degrau do corpo de prova em escada devido a sua baixa dimensão – 3 mm -, pois não foi preenchido perfeitamente com a temperatura mais baixa devido a diminuição da fluidez da liga. Além deste, também foi verificada a baixa resistência a manipulação do modelo pela mesma razão citada anteriormente. Como esse degrau não afetaria o desenvolvimento da atualização dos parâmetros do processo, isto não foi considerado um grande problema, já que foi desenvolvido principalmente a título de curiosidade, para verificar se ocorreria o preenchimento, o que não ocorreu plenamente para nenhuma temperatura.

Ademais, foi possível comprovar a correlação da alta temperatura do banho com a sua redução de viscosidade, possibilitando o maior e melhor preenchimento de peças; no entanto, como dito anteriormente, isto aumenta a probabilidade do surgimento de poros na peça. Também foi visto que a taxa de resfriamento ascende em direção oposta ao sentido do crescimento dos degraus e, por consequência, isso altera a microestrutura do material.

Através da metalografia foi possível encontrar para a maior espessura, uma microestrutura típica de perlita mais ferrita. Para a menor espessura foi encontrado uma

distribuição de fases não condizentes com o esperado (ferrita pró-eutetóide nos contornos de grão de perlita), podendo ser resultado do resfriamento mais acelerado quando comparado com as outras seções da peça.

Por fim, é razoável afirmar que a simulação computacional através do Click2Cast foi ao encontro dos resultados esperados pelo desenvolvimento dos cálculos do sistema de alimentação, confirmando assim a não existência de rechupes; o que comprova que o projeto foi bem desenvolvido. Uma situação que foi observada é que esse sistema está superestimado em aproximadamente 17%, gerando assim uma despesa desnecessária a empresa; então, os canais poderiam ser redimensionados a fim de maximizar o rendimento metálico e usufruir a oportunidade de melhoria que o software possibilitou.

6 TRABALHOS FUTUROS

Uma opção para trabalhos futuros é a instalação de termopares na peça a fim de se obter seu perfil de resfriamento, comprovando a eficiência da simulação computacional. Ainda no problema de defeitos de solidificação, uma opção seria encontrar as outras fontes geradoras destes, e realizar um trabalho similar a este visando a redução ou extinção dos mesmos.

Outra alternativa seria desenvolver trabalho similar a este para outras famílias de peças de maiores dimensões, pois são mais propensas a ter uma maior fração de defeitos de solidificação.

Para finalizar, acredito que uma boa opção de trabalho seria buscar a correlação desses defeitos com as propriedades mecânicas da peça, já que isto é um dos principais fatores de interesse dos clientes. Buscar identificar o efeito de macro e micro-defeitos na resistência ao escoamento e nos fatores que influenciam a mecânica da fratura (propagação de trincas).

Outra possibilidade de pesquisa seria buscar realizar um comparativo do tamanho dos defeitos no material bruto de fusão e no material tratado termicamente, pois, segundo experiências, é possível verificar que esses defeitos são maiores depois da peça ter sido tratada.

Outra sugestão, através do cálculo das vazões com o tempo e área, verificar a turbulência exercida no molde, e buscar correlacionar isso com situações problemáticas e geração de defeitos. Através desse estudo, buscar alternativas para otimizar essa situação.

8 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABREU, Alírio Gerson da Silva; FONSECA, Marco Túlio da. **Alimentação e enchimento de peças fundidas vazadas em molde de areia**. Itaúna: Centro Tecnológico de Fundação Marcelino Corradi, 2003.

AHMAD, R.; TALIB, N. A.; ASMAEL, M. B. A. **Effect of pouring temperature on microstructure properties of Al-S LM6 Alloy sand casting**. Mechanics and Materials Vol. 315, 2013.

AHMAD, R.; TALIB, N. A.; ASMAEL, M. B. A. **Effect of pouring temperature on microstructure properties of Al-Si LM6 Alloy sand casting**. Applied Mechanics and Materials, Vol. 315, p. 856-60, 2013.

AJIBOLA, Olawale Olarewaju; OLORUNTOBA, Daniel Toyin; ADEWUYI, Benjamin O. **Effects of Moulding Sand Permeability and Pouring Temperatures on Properties of Cast 6061 Aluminium Alloy**. International Journal of Metals, 2005.

ALBERTIN, E; SANTOS, A. B.; MATSUMOTO, M. M. **Determinação de parâmetros para os sistemas de alimentação de placas de ferro fundido branco de alto cromo**. Revista da ABIFA: Fundação & Matérias – Primas, São Paulo, ano XIII, Julho / 2010.

AMERICA FOUNDRYMEN'S SOCIETY. **Analysis of Casting Defects**. USA, 1974.

AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY. **The atlas of casting defects**. Illinois, 1999.

ASM Handbook. **Volume 15 Casting**. Editora ASM, 1988.

ASM Handbook. **Volume 4 Heat Treatment**. Editora ASM, 1991.

BALDAM, Roquemar de Lima; VIEIRA, Estéfano Aparecido. **Fundição: Processos e Tecnologias Correlatas**. São Paulo: Editora Érica, 2014.

BATEZZATI, L.; GREER, A. L. **The viscosity of liquid metals and alloys**. Cambridge: Pergamon Press, 1989.

CAMPBELL, J., **Castings**. Butterworth & Heinemann: Oxford, 2003.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. São Paulo: ABM, 2002.

CHVORINOV, N. **Gießerei**. P. 177-186, 201-208, 222-225, 1940.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.

DEFEITOS DE SOLIDIFICAÇÃO. Centro de Informação Metal Mecânica. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/6751-defeitos-de-solidificacao>. Acesso em: 01/11/2016.

FINARDI, Jorge; GUEDES, Luis Carlos. **Fluidez de aço e ferros fundidos: efeito da composição, temperatura de vazamento e desoxidação**. Seminário Sobre Tecnologia em Fundição ABM/COFUN: São Paulo, 1982.

FUOCO, Ricardo; CORRÊA, Edison Roberto; CAVALCANTI, Alberto Holanda. **Caracterização de porosidades em ferros fundidos cinzentos e nodulares**. CONAF, 2007.

HISTÓRICO. Siderúrgica Catarinense, Criciúma, 2016. Disponível em: <http://www.sical.com.br/pt/empresa.php?id_e=1>. Acesso em: 30 out. 2016.

KONDIC, V. **Experimenting with the measurement of fluidity in the casing of metals**. Metals and Materials, 1972.

MICROESTRUTURA DOS AÇOS BAIXO CARBONO E BAIXA LIGA. Universidade federal de Uberlândia, Departamento da Mecânica. Disponível em: <

<ftp://mecanica.ufu.br/LIVRE/Valtair%20-%20Metalurgia/Cap%20a%E7o%20carbono-02.pdf>> Acesso em: 24/11/2016.

MOREIRA, Eduardo de Souza. **O uso do teste de cunha como controle de nucleação na fabricação de peças em ferro fundido cinzento.** Centro de Informação Metal Mecânica, 2008.

MULLER, Arno. **Solidificação e análise térmica dos metais.** Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2002.

PRODUTOS. Siderúrgica Catarinense, Criciúma, 2016. Disponível em: <<http://www.sical.com.br/pt/produtos2.php>>. Acesso em: 30 out. 2016.

ROSA, Rodrigo de Alvarenga. **Apostila estradas de ferro e material rolante.** Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2011.

ROTONDARO, Roberto Gilioli; JARDIM, Antônio Fernando. **Seminário de tecnologia em fundição.** São Paulo: ABM, 1982.

RUBIO, Juan C. Campos; PANZERA, Túlio Hallak; NOGUEIRA, Wagner Alves. **Qualidade Superficial de Peças de Alumínio Fundidas em Molde de Areia.** Matéria (Rio J.): Rio de Janeiro, 2006.

SCHEID, H.; WEISSKOPF K.; BÄHR, R. – Revista Fundição e Serviços – Pg. 28 – Editora Aranda – Ano 18 – Nº 182 – Fev. 2008

SIEVERTS, A. B. **Gases nos bronzes.** - ABM Boletim - pág. 127 – Nº 11 – 1977.

SILVA, Edmundo de Macedo Soares e. **VII Curso de especialização: Fundição.** São Paulo: ABM, 1963.

SILVA, C. R. D. **Projetos de fundição I: Caracterização dos sistemas de massalotes e canais.** Apostila Vitoria ETFES, 1984.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição química dos aços.** São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

TORRE, Jorge. **Manual prático de fundição e elementos de prevenção a corrosão.** Brasil: Humus editora, 2004.

WLODAWER, R. **Directional solidification of steel castings.** New York: Pergamon Press Ltd, 1966.