

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VINÍCIUS NOAL ARTMANN

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2015

VINÍCIUS NOAL ARTMANN

**PROJETO DE COMPONENTES A PARTIR DE TECNOLOGIA
DE FUNDIÇÃO E FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE
FUNDIÇÃO PARA LIGAS DE ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Prof. Dr. Dalmarino Setti

Co-orientador: Prof. Dr. Márcio Nakaura

PATO BRANCO

2015

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Vilson e Irineusa, e meus avós, Deonildo e Irani pelo papel que representaram na vida de seus filhos e netos.

Ao Aurélio que está iniciando essa caminhada, seus esforços não serão prescindíveis, mas seu aprazimento será compensador.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por ter trilhado meu caminho até aqui, abençoando a mim e as pessoas que me cercam.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Curso de Engenharia Mecânica, representados por corpo docente, direção e administração, estes que trabalham conjuntamente com o objetivo de proporcionar o melhor ambiente possível para o compartilhamento do conhecimento.

Aos meus orientadores Dalmarino e Márcio, pelo suporte dado a mim e ao restante do corpo discente.

Aos meus pais Vilson e Irineusa, avós Deonildo e Irani, e irmãos Aurélio, Taís e Alencar pelo apoio, amor e incentivo.

A Elisangela, que foi minha parceira desde o início desta caminhada, sendo o principal bastidor para esta conquista.

Aos professores Gilson Ditzel e Gilson Adamczuck, do Laboratório de Produção, pela ajuda que me deram durante o curso e na produção deste trabalho.

Ao Marcelo Crestani pelo auxílio dado na produção deste trabalho.

Aos meus amigos Bruno, Jean, Renan, Ruan, Marco, Rogério, Alex que jamais serão esquecidos.

RESUMO

ARTMANN, Vinícius N. Projeto de componentes a partir de tecnologia de fundição e fabricação de ferramentas de fundição para ligas de alumínio. 2015. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015.

Esta pesquisa apresenta uma abordagem acerca dos processos de fundição e suas tecnologias, para ligas de alumínio, associando conhecimentos sobre processos de fabricação a conceitos da Ciência dos Materiais. Trata-se de uma pesquisa bibliográfica, na qual o procedimento utilizado para a captação das informações foi a pesquisa baseada em materiais já elaborados por pesquisadores da área. A partir da pesquisa sobre motores *stirling*, deu-se início ao projeto e à fabricação de componentes por meio da fundição de alumínio, utilizando o processo de fundição em areia. Dessa maneira, o presente estudo objetivou analisar a melhor maneira de fabricação para estes componentes por meio da fundição, desenvolver o projeto das peças analisando a solidificação e construção das ferramentas de fundição necessárias para a fabricação das peças. Para isso foi utilizado conhecimentos científicos e tecnológicos. Dessa forma, o produto final deste trabalho são as ferramentas necessárias para a produção e reprodução das peças por meio de fundição.

Palavras-chave: Processos de fabricação; Tecnologia de Fundição; Liga de Alumínio; Projeto e Confecção de Ferramentas de Fundição

ABSTRACT

ARTMANN, Vinícius N. Design components from casting technology and manufacturing casting tools for aluminum alloys. 2015. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015.

This research presents an approach about the casting processes and technologies for aluminum alloys, combining knowledge of manufacturing processes to concepts of Materials Science. This is a literature in which the procedure used to capture the information was research based on material already developed by researchers. From the research on stirling engines, start was given to the design and manufacture of components through the aluminum smelter, using the process of sand casting. Thus, the present study aimed to analyze the best way to manufacture these components through casting, develop the design of the pieces analyzing solidification and construction of casting tools needed to manufacture the parts. For it was used scientific and technological knowledge. Thus, the final product of this work are the necessary tools for the production and reproduction of components by casting.

Keywords: Manufacturing processes; Foundry technology; Aluminum Alloy; Design and Casting Tools Making.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classes de processos de fabricação.....	17
Figura 2 – Classificação dos processos de fundição.....	20
Figura 3 - Diagrama sequencial para produção de fundidos.	23
Figura 4 - Desenho de Interseções.....	25
Figura 5 - Tipos de Modelo usados na fundição de areia. (a) Modelo sólido, (b) Modelo dividido, (c) Modelo Match-Plate, (d) Modelo <i>Cope-and-Drag</i>	26
Figura 6- Macho preso na cavidade do molde por meio de <i>chaplets</i>	28
Figura 7 - Recomendação de relação dimensional em machos de areia.....	29
Figura 8 - Principais elementos de um sistema de alimentação.....	31
Figura 9 - Variação da posição dos canais.....	33
Figura 10 - Projeto Motor Stirling tipo Gamma. Fonte: Autor	36
Figura 11 – Moldagem a parti de modelo <i>matchplate</i>	38
Figura 12 - Conceito de geometria da peça Base. Fonte: Autor	40
Figura 13 - Conceito do arranjo interno da peça Base.....	41
Figura 14 - Vista lateral do modelo.	42
Figura 15 – Vista perpendicular do modelo.	43
Figura 16 - Conceito peça Mancal.	44
Figura 17 - Modelo bipartido da Peça Mancal.	45
Figura 18 - Vista frontal do modelo bipartido.....	46
Figura 19 - Modelo bipartido da peça Base após usinagem no centro de usinagem CNC.....	47
Figura 20 - Impressão 3D da peça Mancal.	48
Figura 21 - Divisão da peça Base para cálculo de Chvorinov	50
Figura 22 – Divisão da peça mancal para o cálculo de Chvorinov.....	52
Figura 23 - Sistema de Enchimento e alimentação. (a) Vista superior peça Base; (b) Vista isométrica peça Base; (c) Vista isométrica peça Mancal; (d) Vista superior peça Mancal.	54
Figura 24 - Placas para moldagem . (a) Placa de moldagem para a peça Base; (b) Placa de moldagem para a peça Mancal.	55

Figura 25 - Análise do tempo de solidificação.....	56
Figura 26 – Fundidos	57

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TOLERÂNCIA DE CONTRAÇÃO PARA VÁRIOS MATERIAIS FUNDIDOS.....	23
TABELA 2 - TOLERÂNCIA DE ACABAMENTO RECOMENDADO PARA METAIS NÃO FERROSOS.....	24
TABELA 3 - PARÂMETROS CALCULADOS PARA SISTEMA DE ENCHIMENTO	49
TABELA 4 - MÓDULO DE CHVORINOV DE ACORDO COM AS SEÇÕES DA PEÇA BASE.....	51
TABELA 5 - MÓDULO CHVORINOV DE ACORDO COM AS SEÇÕES DA PEÇA MANCAL.....	51
TABELA 6 - VALORES DE CÁLCULO DOS MASSALOTES.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Re	Coeficiente de Reynolds
V	Velocidade
d	Diâmetro hidráulico
ν	Viscosidade Cinemática
Q	Vazão Volumétrica
A_1	Área da seção transversal no ponto 1
A_2	Área da seção transversal no ponto 2
V_1	Velocidade no ponto 1
V_2	Velocidade no ponto 2
g	Aceleração gravitacional
h	Altura
Vol	Volume
t	Tempo
α	Coeficiente de perda
H	Altura efetiva dos sistemas de canais de vazamento
M	Módulo de Chvorinov da peça
M_m	Módulo de Chvorinov do massalote
M_n	Módulo de Chvorinov do pescoço de alimentação
D	Diâmetro do massalote
p	Parâmetro de projeto dos massalotes
a	Dimensão da aresta do pescoço de alimentação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	16
2.2 PROCESSO DE FUNDIÇÃO	17
2.2 PROCESSO DE FUNDIÇÃO	18
2.3 TECNOLOGIA DE FUNDIÇÃO	21
2.3.1 Adaptação para fundição.....	21
2.3.2 Ferramental	25
2.3.3 Sistema de enchimento e alimentação.....	29
2.4 SIMULAÇÃO	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1 ABORDAGEM INICIAL DO PROBLEMA	35
3.2 ADAPTAÇÃO PARA FUNDIÇÃO	35
3.3 PROJETO E CONFECÇÃO DO FERRAMENTAL	37
3.4 SIMULAÇÃO	39
4. RESULTADOS OBTIDOS.....	39
4.1 ADAPTAÇÃO PARA FUNDIÇÃO	39
4.2 FABRICAÇÃO DOS MODELOS	46
4.3 SISTEMA DE ENCHIMENTO E ALIMENTAÇÃO.....	49
4.4 SIMULAÇÃO	56
4.5 FUNDIÇÃO.....	57
5. CONCLUSÃO.....	59
REFERÊNCIAS.....	61
APÊNDICE	63
APÊNDICE I - principais medidas do conceito da peça base.....	63
APÊNDICE II - PRINCIPAIS MEDIDAS DO CONCEITO DA PEÇA MANCAL.....	64

APÊNDICE III - principais medidas da base remodelada.....65

APÊNDICE IV - Principais medidas do mancal remodelado66

1. INTRODUÇÃO

Assuntos relacionados à produção e seus processos, juntamente com o estudo da Ciência dos Materiais foi um ramo que despertou interesse do autor deste trabalho desde o início de sua graduação. Este foi um fator determinante na escolha de assunto para o Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná em Pato Branco.

A Coordenação de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná possui linha de pesquisa na área de estudo de motores stirling. Esta linha de pesquisa está atualmente desenvolvendo um motor stirling tipo gamma.

Unindo o interesse do autor com a necessidade de fabricação de alguns componentes do motor stirling, surgiu a ideia deste trabalho. O trabalho em questão descreve as etapas de fabricação dos componentes necessários para fundição de peças.

O processo de fundição em areia, não é uma operação única, como pode-se pensar que consiste apenas na operação de fundição, mas na realidade o processo segue uma sequência, anteriormente à fundição deve-se fabricar o modelo e preparar o molde (GROOVER, 2007).

Todas estas etapas do processo de fundição são tratadas neste trabalho, e estão baseadas em conhecimentos científicos e tecnológicos publicados por pesquisadores da área.

Deste modo este trabalho tem como objetivo geral, produzir as ferramentas necessárias para a produção de componentes mecânicos por meio do processo de fundição.

Os objetivos específicos deste trabalho são: (i) projetar as peças a serem fundidas; (ii) produzir um modelo para cada peça, (iii) projetar e produzir canais de alimentação e enchimento, (iv) montar as caixas e as placas de fundição contendo canais e massalotes.

Em vista disto, o produto final deste trabalho são os ferramentais que ficarão disponíveis para a produção e reprodução das peças por meio de fundição de alumínio.

O procedimento utilizado para a captação de informação relacionada ao assunto será a pesquisa bibliográfica, que está baseada em materiais já elaborados por cientistas da área por meio de livros e artigos científicos.

A composição teórica se encontra na segunda seção deste trabalho e foi dividida em quatro grandes assuntos: *(i)* Processos de Fabricação; *(ii)* Processo de Fundição; *(iii)* Tecnologia de Fundição.

O material utilizado para elaboração desta parte foi predominantemente baseado em obras de autores como: Chiaverini (1987), ASM (1998), Beeley (2001), Groover (2007), Muenprasertdee (2007) e Kalpakjian e Schmid (2009).

A terceira seção descreve os materiais e método científicos utilizados para a elaboração deste trabalho, para melhor entendimento foi dividido de acordo com as fases do processo: *(i)* Abordagem inicial do problema; *(ii)* Adaptação para fundição; *(iii)* Projeto e confecção dos Ferramentais.

A quarta seção deste trabalho retrata os resultados obtidos com este trabalho, para organizar estes resultados e conseqüentemente facilitar a compreensão, esta seção foi dividida de acordo com a sequência que estes resultados foram alcançados: *(i)* Adaptação para fundição; *(ii)* Fabricação dos modelos; *(iii)* Projeto e fabricação dos sistemas de enchimento e alimentação.

A quinta seção serve para discussão sobre os resultados obtidos com este trabalho, onde o autor realiza uma interpretação crítica sobre o trabalho, utilizando como base os resultados obtidos e a metodologia aplicada. E por fim a conclusão que aponta as considerações finais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentado a revisão de literatura. São apresentados a definição e classificação dos processos de fabricação e dos processos de fundição. Também são abordados assuntos relacionados à tecnologia de fundição, para facilitar o entendimento do assunto, este tópico foi dividido em outros três tópicos, adaptação para fundição, ferramental e sistema de alimentação.

2.1. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Kalpakjian e Schmid (2009) define processo de fabricação como a combinação de processos que criam um determinado número de peças que montados formam um objeto. Ashby (2005) define como o método de dar forma, unir ou dar acabamento.

Beeley (2001) separa os principais processos metalúrgicos em cinco grupos:

- (i) Conformação Mecânica;
- (ii) Fabricação por união;
- (iii) Usinagem;
- (iv) Metalurgia do pó;
- (v) Fundição.

Ashby (2005) classifica os processos, figura 1, de acordo com a rota do progresso da fabricação, utilizando os termos citados anteriormente, dar forma, unir e dar acabamento.

O processo de fabricação como um todo irá consistir normalmente em operações primárias e secundárias. As operações primárias são aquelas que convertem a matéria-prima em uma peça reconhecível (por exemplo, as operações de fundição, conformação plástica, compactação de pós, moldagem, etc.), e quanto as operações secundárias são aquelas empregadas subsequentemente para produzir a peça acabada (por exemplo, tratamento térmico, polimento, soldagem, perfuração, pintura, decoração). (CALLISTER; WILLIAM, 2012)

“A seleção de processo de fabricação é também uma decisão estratégica, pois alterações são dispendiosas. ” [...] “Ele deve satisfazer a dois objetivos básicos, atender a especificação do produto final e ser rentável. ” (MELO, 2010, p.8)

2.2 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Começou a ser utilizado cerca de seis mil anos atrás, e continua a ser um processo de fabricação importante para a produção tanto de peças muito pequenas como peças muito grandes e complexas. (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009, p.237)

No processo de fundição de metais o líquido é derramado ou forçado para o interior de um molde, aonde é solidificado devido o resfriamento (ASHBY, 2005). Beeley (2001) afirma que o fundido, nome dado ao produto da fundição, é fabricado em apenas um passo, sem nenhuma operação intermediária de conformação mecânica, como laminação ou forjamento.

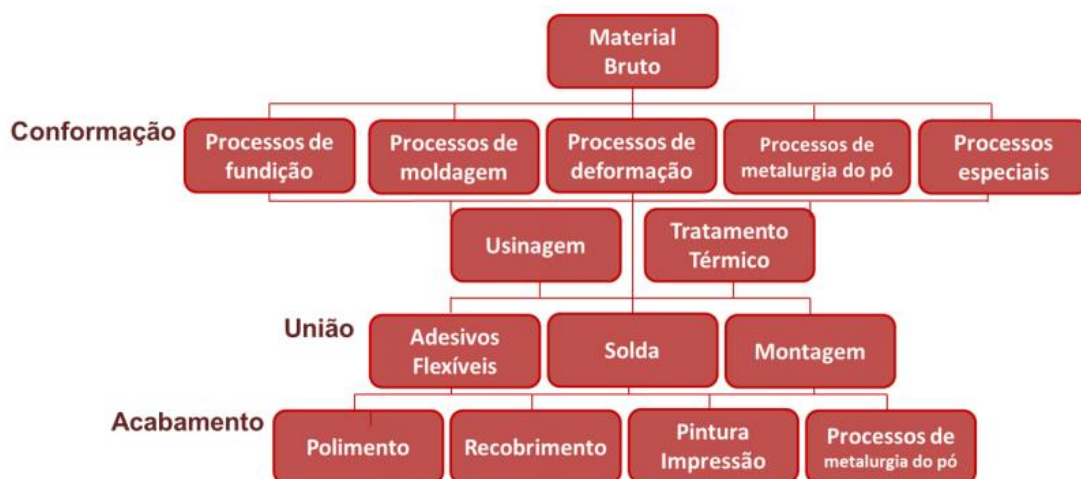


Figura 1 – Classes de processos de fabricação.

Fonte: Araujo (2013), apud Ashby (2005)

“A seleção de processo de fabricação é também uma decisão estratégica, pois alterações são dispendiosas. ” [...] “Ele deve satisfazer a dois objetivos básicos, atender a especificação do produto final e ser rentável. ” (MELO, 2010, p.8)

2.2 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Começou a ser utilizado cerca de seis mil anos atrás, e continua a ser um processo de fabricação importante para a produção tanto de peças muito pequenas como peças muito grandes e complexas. (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009, p.237)

No processo de fundição de metais o líquido é derramado ou forçado para o interior de um molde, aonde é solidificado devido o resfriamento (ASHBY, 2005). Beeley (2001) afirma que o fundido, nome dado ao produto da fundição, é fabricado em apenas um passo, sem nenhuma operação intermediária de conformação mecânica, como laminação ou forjamento.

O molde possui uma cavidade, nada mais é que o negativo da peça que se deseja fundir. A forma da cavidade do molde pode ser tal que corresponda praticamente ou quase à forma definitiva da peça projetada (CHIAVERINI, 1986, p. 1).

Dentre todos os processos de fabricação, a fundição se destaca por permitir a produção de peças com grandes variedades de formas e tamanhos, e também pela possibilidade de se produzir peças unitárias, como também pode ser produzido peças em série, isso se torna possível pelo fato de ser possível escolher o processo de fundição que melhor se adapta às exigências de projeto, dentro de todos os outros processos, sendo esses processos de fundição ou não (SOARES, 2000, p. 1). Porém para Beeley (2001), a exploração completa dos processos de fundição não requer apenas o estudo cuidadoso de suas vantagens, mas sim de suas potenciais dificuldades e limitações.

Há poucas limitações quanto a peso e tamanho dos fundidos, as restrições podem existir devido aos mecanismos de alimentação de metal fundido e levantamento e movimentação do fundido. Desta maneira é possível fundir peças de centenas de toneladas, até peças que possuem menos que dez gramas utilizando processos de fundição de metais (BEELEY, 2001).

Segundo Beeley (2001), nenhum outro processo oferece a possibilidade de dar forma a figuras de complexas como a fundição, mesmo que sendo possível a elaboração de alguns contornos e detalhes intrínsecos por meio de processos de usinagem, seus gastos seriam maiores em comparação com a fundição. Porém

existem algumas formas geométricas que apresentam maior dificuldade para a fundição, como por exemplo peças longas que possuem seção transversal estreita.

Teoricamente qualquer liga de material utilizada na engenharia pode ser fundida utilizando a técnica de fundição adequada. Porém cada liga possui sua especificação de fundição, que são desenvolvidas afim de explorar o ponto ótimo entre a fundição e suas propriedades mecânicas (BEELEY, 2001).

Em relação ao custo do ferramental é adequado para a produção de uma única peça ou de grandes séries. Para poucas peças, os ferramentais podem ser produzidos em materiais de baixo custo, como madeira isopor, por exemplo. E, para grandes séries o custo de um ferramental mais elaborado ainda é competitivo em relação aos demais processos primários (SETTI, 2010 p.11, apud BEELEY 2001)

Quanto a flexibilidade do processo, a fundição pode ser realizada com baixo investimento quando a produção é unitária ou em pequena escala. Porém, também pode ser realizada por operações mecanizadas e automatizadas de alta produção com custo unitário baixo (BEELEY, 2001). A ASM (1998) ressalta a rapidez do processo de fundição em relação ao produto acabado, visto que após a solidificação do metal as dimensões e seu acabamento estão próximas do desejado como produto final, sendo assim, este é o processo metalúrgico mais simples e direto conhecido.

Para Beeley 2001, a fundição de metais pode competir com processos como forjamento, soldagem e sinterização de plásticos, cerâmicas e metais não-ferrosos.

Com o intuito de facilitar o entendimento sobre o assunto, Groover (2007) divide os processos de fundição em três grandes categorias de acordo com o tipo de molde e modelo utilizado: molde perecível com modelo perecível, molde permanente e molde perecível com modelo permanente. A figura 2 exemplifica cada uma dessas categorias. Segundo a ASM (1998) algumas subclassificações podem ser feitas de acordo com o tipo do modelo.

Molde perecível significa que o molde terá que ser destruído após a solidificação do metal, para a retirada do fundido. Estes moldes são feitos em areia ou em gesso, sua utilização é possível graças aos ligantes. Fundição em areia é o processo de fundição mais conhecido dentro da categoria de molde perecível, nele o metal líquido é derramado dentro do molde feito de areia, depois que o material endurece o molde é sacrificado para a retirada do fundido. (GROOVER, 2007)

Molde permanente significa que o mesmo molde pode ser usado para produção de vários fundidos. Geralmente são feitos de metais, mas pode ser encontrado na forma de material cerâmico refratário. O material do molde deve suportar a alta temperatura da operação. O molde permanente consiste em duas ou mais partes que quando abertas permitem a saída do fundido. *Die Casting* é o processo mais conhecido desta família (GROOVER, 2007).

Segundo Groover (2007) as formas mais complexas são geralmente possíveis utilizando os processos de molde perecível, visto que os processos por moldes permanentes são limitados pelo fato da necessidade de abrir o molde. Porém os moldes permanentes possuem vantagem econômica quando se trata de alta produção.

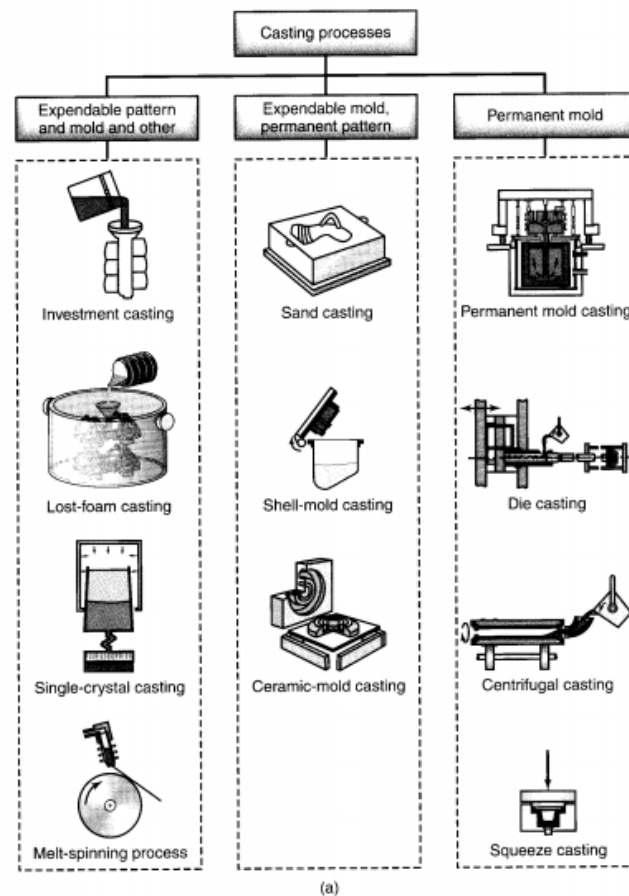


FIGURE 1.6a Schematic illustrations of various casting processes.

Figura 2 – Classificação dos processos de fundição.

Fonte: Groover (2007)

Examinando os processos que utilizam fundição, Beeley (2001) separou-os em cinco estágios, divididos em duas grandes fases, a primeira delas é a fase preliminar, composta por três estágios: (1) decisão de utilizar fundição; (2) projeto

detalhado; (3) contato comercial, para consultas, cotações, ordem de serviços, etc. A segunda grande fase é chamado de fase produtiva, composta por mais dois estágios: (4) produção das ferramentas; (5) fundição e acabamento (Beeley, 2001).

2.3 TECNOLOGIA DE FUNDIÇÃO

Ao projetar uma peça para ser fundida, devem ser levados em conta os fenômenos que ocorrem na solidificação, de modo a evitar que os defeitos originados a partir desses fenômenos apareçam nas peças solidificadas (CHIAVERINI, 1986). Esta seção abordará técnicas que foram elaboradas a partir do conhecimento maior destes fenômenos, e que são utilizadas para evitar a formação de defeitos.

2.3.1 Adaptação para fundição

Para a modelagem de peças fundidas devem ser levantadas as considerações técnicas. Considerações técnicas incluem a adequação do fundido de acordo com as características metalúrgicas das ligas metálicas, e de acordo com os tipos de forma, dimensões e acabamento superficial (BEELEY, 2001).

Beeley (2001) organiza as considerações técnicas em três itens, (i) formato, a fundição fornece maior liberdade de projeto levando em consideração aspectos de formas e tamanhos, mesmo simples e complexos. (ii) Características dimensionais e de superfície, estes são um dos atributos mais críticos da fundição. Visto que a tolerância determina a escolha de processo e os locais que necessitarão de usinagem de acabamento. Fundição não é um processo utilizado para se conseguir pequenas tolerâncias, por isso tolerâncias de usinagem são incorporadas no projeto do fundido.

O terceiro item levantado por Beeley (2001) é (iii) características metalúrgicas, teoricamente qualquer composição química pode ser fundida, porém os melhores resultados são conseguidos utilizando ligas desenvolvidas especificamente para a fundição. Além de que características estruturais afetam as

condições de fundição como, tamanho e forma de grão, solutos e distribuição de uma segunda fase.

Chiaverini (1986) fornece recomendações afim de prever e solucionar os defeitos e também facilitar o projeto da peça fundida (i) proporcionar adequadamente as seções das peças; (ii) projetar a peça de modo que haja uma variação gradual das diversas seções que a compõem, evitando cantos vivos e mudanças bruscas de seção; (iii) considerar uma espessura mínima de parede: Paredes muito finas não se enchem bem de metal líquido; (iv) evitar fissuras de contração; (v) Prever conicidade para melhor confecção do molde: A confecção do molde torna-se dificultada se não houver conicidade suficiente no modelo; (vi) deixar sobremetal para a usinagem posterior; (vii) Verificar a divisão do modelo. As linhas devem ser feitas no mesmo nível, tanto quanto possível; (viii) estudar adequadamente a localização dos machos. (ix) prever a colocação dos canais de vazamento. (x) eliminar rebaixos: evitar mudanças abruptas de seções ao longo de uma peça, visto que a taxa de resfriamento será diferente podendo causar distorção da peça ou o surgimento tensões internas no material.

Os passos para a fundição desde de modelagem até o produto acabado são basicamente os que estão ilustrados na figura 3. Esta sequência pode ser utilizada para uma grande gama de processos de fundição, algumas pequenas mudanças podem ser aplicadas, porém está de acordo com o processo de fundição em areia.

Como pode ser visto na Figura 3 após a determinação da técnica de fundição é necessário produzir o modelo. Responsável por criar a cavidade referente à superfície externa da peça, mesmo que ele possua esta função o modelo não é dimensionalmente idêntico ao fundido. Existem uma série de tolerâncias que devem ser utilizadas no projeto de um modelo para garantir que as dimensões finais do fundido estejam corretas. (VOIGT, 1998).

A VOIGT (1998) considera basicamente quatro tipos de tolerâncias para fabricação de um modelo, tolerância de contração, tolerância de traçado, tolerância de usinagem e tolerância de distorção.

Tolerância de contração é o fator de correção realizado no modelo afim de compensar a contração do metal durante a solidificação e resfriamento do fundido até a temperatura ambiente. A contração total é volumétrica, mas normalmente é expressa linearmente. A tabela 1, lista as tolerâncias de contração comumente utilizadas para várias ligas fundidas (VOIGT, 1998).

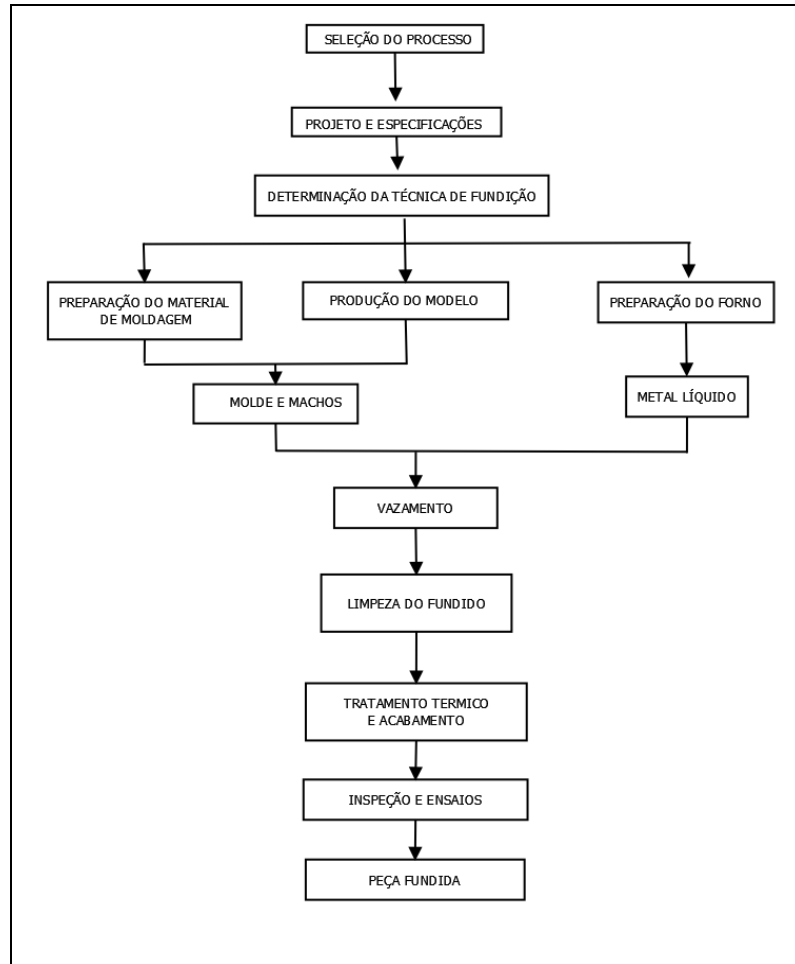


Figura 3 - Diagrama sequencial para produção de fundidos.

FONTE: Adaptado de Beeley (2001)

Tabela 1 - Tolerância de contração para vários materiais fundidos.

Liga Fundida	Tolerância	Contração aproximada	Tolerância de contração (mm/m)
Aço	'	1.6	15/7
Ferro Fundido Cinzento	1 em 100	1.0	8/4
Ferro Fundido Modular	1 em 120	0.8	7/8
Alumínio	1 em 77	1.3	13/1

Fonte: Adaptado de VOIGT (1998)

Tolerância de traçado é o afunilamento vertical das faces do modelo que permite a remoção do molde sem danificar as paredes do molde. (Em modelos repartidos verticalmente, necessita-se de afunilamento horizontal). Chiaverini (1986) traduz este afunilamento como “ângulo de saída” e recomenda o uso de 3°. Já a ASM (1998) recomenda a utilização de 1,5° para faces externas, e ângulos maiores

para faces internas, isto para quando o processo de moldagem é mecanizado, quando se trata de modelamento manual ângulos maiores devem ser utilizados.

Tolerância de usinagem de acabamento: é o excesso de metal de todas as faces do fundido que requerem acabamento. A necessidade de acabamento depende de vários fatores incluindo o tipo de metal, tamanho, formato, rugosidade da superfície, defeitos superficiais que podem ser esperados, distorção e tolerância dimensional. Modelos acurados podem produzir fundidos que necessitem do mínimo de acabamento, reduzindo consideravelmente o custo de produção. A tabela 2 sugere tolerâncias dimensionais para metais não ferrosos de acordo com a dimensão em questão, e com a configuração da medida, se é furo, superfície, ou superfície de topo (VOIGDT, 1998).

Tabela 2 - Tolerância de acabamento recomendado para metais não ferrosos.

Dimensão do modelo	Furo	Superfície normal	Superfície de topo
Até 76 mm	1.6	1.6	1.6
76-152 mm	2.4	1.6	2.4
152-305 mm	2.4	1.6	3.2
305-510 mm	3.2	2.4	3.2
510-915 mm	3.2	3.2	4.0
915-1524 mm	4.0	3.2	4.8

Fonte: Adaptado de Voigdt , 1998 (apud American Foundrymen's Society, 1986) .

A distorção é causada pelo estresse no material causado pela contração não uniforme durante a solidificação de peças com seções irregulares, devido a isto em alguns casos recomenda-se a utilização de tolerância de distorção. Esta distorção pode ser corrigida com pressão mecânica ou endireitamento do fundido. Porém se a distorção for proeminente, o formato do modelo deve ser corrigido considerando agora a distorção. (VOIGDT, 1998; BEELEY, 2001)

Beeley (2001) afirma que não existe um tratamento específico de seções afim de auxiliar a alimentação do fundido, ele recomenda que uniformidade de seções ou alteração progressiva das mesmas previne de possíveis inconvenientes relacionados à alimentação direta.

O controle da diferença de seção juntamente com a maneira como a cristalização acontece, permite o fenômeno da solidificação direcional e garante uniformidade interna no material (BEELEY, 2001).

Outro problema relacionado à solidificação do fundido podem ocorrer em cruzamentos de membros, Beeley (2001) aconselha reduzir ou eliminar os pontos quentes através do projeto dos componentes.

Para eliminação dos pontos quentes procura-se diminuir a massa da junção, e utilizar ângulos maiores entre os membros. Se não for possível o desenho radical da junção, utiliza-se um afinamento da seção no centro da interseção. A Figura 4 apresenta alguns arranjos alternativos para uma seção X.

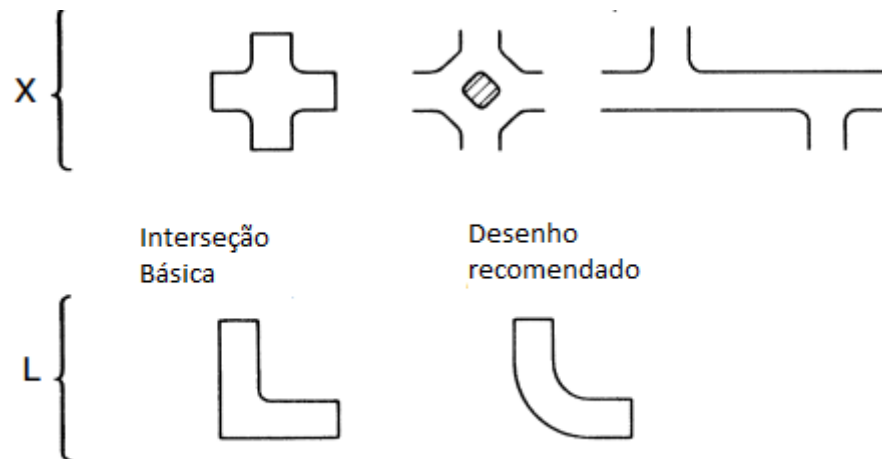


Figura 4 - Desenho de Interseções.
Fonte: Adaptado de Beeley (2001).

Como dito anteriormente a distorção dos materiais é causada pela tensão residual no material e esta por sua vez, é causada pela variação das taxas de resfriamento. Alguns pontos da junção podem servir de concentradores de tensão para o material, afetando assim sua rigidez. Deste modo a utilização de arredondamentos nestes pontos pode ser crucial. (BEELEY, 2001)

2.3.2 Ferramental

O formato do molde é fabricado a partir da impressão da forma geométrica do modelo na superfície inferior do molde. Além do molde e do modelo, em alguns casos utiliza-se machos. Este tópico abordará as ferramentas básicas que devem ser produzidas para a fabricação do fundido

Fundição em areia requer a produção de um modelo que possui basicamente a mesma escala da peça a ser produzida, porém deve possuir

dimensões alargadas para prevenir a contração e as tolerâncias de usinagem de acabamento como foi abordado no tópico anterior (GROOVER, 2007 p.227).

No Brasil o modelo é feito, geralmente, de madeira, a espécie mais utilizada é o Cedro. A madeira é comumente utilizada pelo fato de ser facilmente moldada, porém ela possui as desvantagens de tender a empenar ou ser desgastada pela areia quando compactada, o que acaba limitando a quantidade de vezes que o modelo pode ser utilizado (CHIAVERINI, 1986 p.13-14).

Modelos de metal são mais caros para serem produzidos, mas possuem vida muito mais longa. Para a produção seriada, em que são utilizadas máquinas de moldar, o material mais comum para confecção dos modelos é o alumínio, devido a sua leveza e usinabilidade. Plásticos também podem ser utilizados para a confecção de modelos, que possuem características intermediárias entre a madeira e o metal. A seleção do material do modelo depende da quantidade de fundido que serão feitos com o modelo em questão (GROOVER, 2007 p. 227; CHIAVERINI, 1986 p. 13).

A Figura 5 ilustra alguns tipos de modelos que podem existir. O mais simples é chamado de modelo sólido, que possui a mesma geometria do fundido do fundido, ajustado para a contração e usinagem de acabamento. É o modelo mais fácil de ser fabricado, porém não é o mais fácil de ser utilizado na fundição em areia, devido à dificuldade de determinar a linha de partição e o ajuste dos canais (GROOVER, 2007).

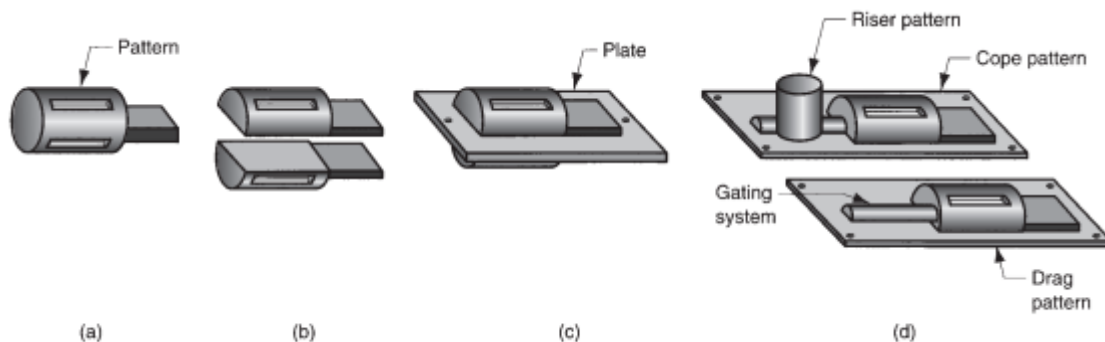


Figura 5 - Tipos de Modelo usados na fundição de areia. (a) Modelo sólido, (b) Modelo dividido, (c) Modelo Match-Plate, (d) Modelo *Cope-and-Drag*.

FONTE: GROOVER (2007).

Como mostra a Figura 5 (b) existe também o modelo dividido, que nada mais é que modelo sólido dividido ao longo de um plano condizente com a linha de repartição do molde. (GROOVER, 2007 p. 227)

Para ter qualidade em altas produções, Groover (2007, p.227-228), recomenda a utilização e modelos do tipo *match-plate*, Figura 5 (c), que são as duas peças do modelo dividido presas em lados opostos de uma chapa de metal ou madeira. Existem também o modelo tipo *cope-and-drag*, que são similares ao *match-plate*, exceto pelo fato de possuir as partes do modelo dividido em chapas diferentes.

O modelo é necessário juntamente com os equipamentos de moldagem e macharia para a confecção do molde. A produção do molde é o primeiro grande estágio do processo de fundição (BEELEY, 2001).

Chiaverini (1986, p.17) lista uma série de requisitos que o molde deve preencher para que a fundição seja realizada nas melhores condições. (i) o molde deve suportar o peso do metal líquido, (ii) deve suportar a ação erosiva do metal líquido no momento do vazamento, (iii) devem gerar a menor quantidade possível de gás, (iv) deve facilitar a fuga de gases gerados para a atmosfera.

A fundição em areia é considerada um dos processos mais básicos e amplamente utilizados na fundição. A areia de fundição é sílica (SiO₂) ou sílica misturado com outros minerais. Os meios de moldagem da areia seguem dois métodos distintos. (PIWONKA, 1998)

No primeiro a areia é ligada quimicamente de uma forma que ligante revista a superfície do grão, que posteriormente será curado por meio de alguma reação química. No segundo método a areia também é misturada com o ligante, porém este é moldado e se torna uma massa rígida através da aplicação de forças, conhecido como moldagem de areia verde (PIWONKA, 1998).

A impressão da superfície do modelo no molde define o formato externo de um objeto, no entanto se o fundido tiver superfícies internas surge a necessidade de utilizar um macho. (GROOVER, 2007, p.228)

Segundo Groover (2007, p. 228) o macho consiste em um modelo em escala normal da superfície interna de uma peça. Ele é inserido dentro da cavidade antes de o metal ser derramado. É usualmente feito de areia compactada na forma requerida, e assim como o modelo deve incluir tolerâncias devido a contração e o acabamento.

Dependendo do formato da peça, tamanho e peso do macho, este pode necessitar ou não o uso de *chapllets*, que servem de suporte para manter a posição

do macho durante o vazamento do metal líquido (GROOVER, 2007, p. 228; GOODWAY, 1998).

Os *chaplets* podem ser entendidos observando a figura 6, geralmente são feitos em um material com temperatura de fusão maior que o metal fundido e após a fundição ele fica dentro do fundido e sua parte sobressalente pode ser cortada.

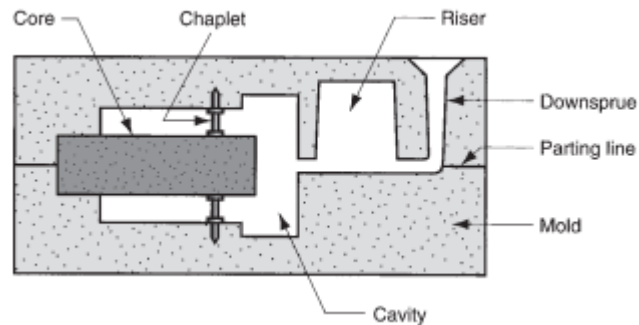


Figura 6- Macho preso na cavidade do molde por meio de *chaplets*.

FONTE: GROOVER (2007, p. 228)

A figura 6 possui uma extremidade presa por *chaplets* e outra presa pela cavidade do molde. O projeto do modelo deve prever a área para fixação do macho e que essa área seja suficiente para suportar o comprimento do macho, caso não suporte pode ocorrer a deslocação ou ruptura do macho.

Beeley (2001) através da figura 7, recomenda o comprimento máximo de macho para quatro configurações diferentes. Para o caso (a) recomenda-se a utilização de machos com comprimento máximo igual ao diâmetro do macho para casos em que o diâmetro seja menor que duas vezes a espessura da parede e o furo da peça seja passante, para o caso (b) é a mesma configuração do caso (a) porém o furo é cego, neste caso o comprimento do macho não deve ser maior que a metade do diâmetro.

Para o caso (c) que consiste num furo passante, onde o diâmetro fica entre o dobro e o triplo da espessura, o comprimento máximo é de três vezes o diâmetro. Para o caso (d) que se assemelha ao caso (c) exceto pelo fato de ser um furo cego, recomenda-se comprimento máximo de duas vezes o diâmetro (BEELEY, 2001, p.424).

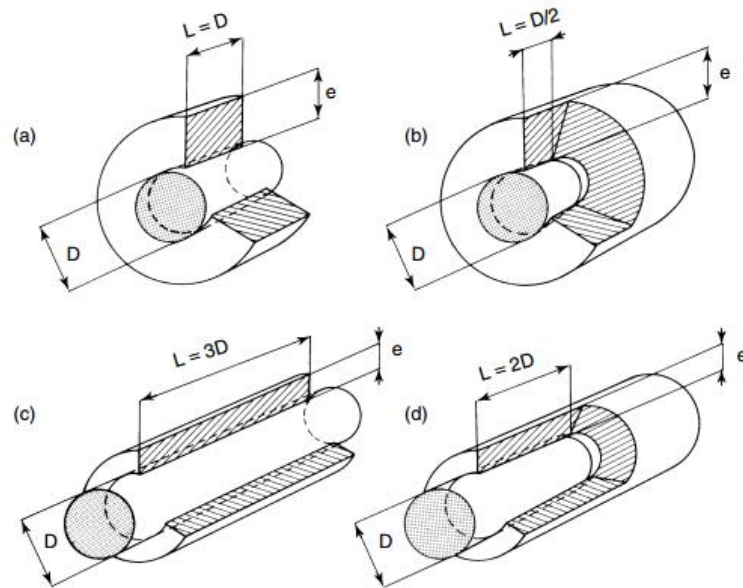


Figura 7 - Recomendação de relação dimensional em machos de areia.

FONTE: BEELEY (2001, p. 425)

2.3.3 Sistema de enchimento e alimentação

O sistema de enchimento e alimentação, deve ser projetado com o a finalidade de fornecer metal líquido para a cavidade e fornecer uma reserva suficiente para o fundido durante a contração que acontece na solidificação. (GROOVER, 2007 p. 230)

Sabendo que durante a passagem do estado líquido para o sólido o metal se contrai, conseqüentemente se não for colocado mais metal líquido no molde que o necessário, a peça ficará incompleta. (SOARES, 2000)

Quando essa falta de material é concentrada numa região damos o nome de rechupe, reservando o termo porosidade para micro-rechupes distribuídos por toda a peça ou - melhor ainda - para buracos decorrentes da evolução de gases. Para evitar que a presença de rechupe possa afetar a sanidade do fundido, lança-se mão de um sistema de alimentação, que será tão mais necessário quanto mais maciça for a peça em questão. (SOARES, 2000)

Durante o processo de fundição de uma peça, surge o “ponto quente”, que é a zona da peça com maior temperatura, por conseguinte esta será a área que solidificará por último. Vazios ou rechupes tendem a surgir no ponto quente. (PASSINI, 2005)

Para que haja a um gradiente térmico de solidificação, o alimentador, também conhecido como massalote, deve ser posicionado junto ao ponto quente, para ser o último ponto a se solidificar, tirando neste caso a possibilidade de defeitos por vazios na peça (PASSINI, 2005 p. 24).

Passini (2005, p. 24) afirma que existem basicamente dois tipos de alimentadores na prática:

- (i) Alimentadores atmosféricos ou de topo, onde a superfície fica em contato com a atmosfera, devido a isto deve ser posicionado na parte superior da peça, sua grande vantagem está relacionada ao a facilidade de exaustão dos gases, porém possui uma grande perda de calor por estar em contato com a atmosfera;
- (ii) Alimentador cego, este por ficar completamente no interior do molde pode ser posicionado em qualquer posição. Por ser totalmente preenchido pelo material do molde a perda de calor é reduzida.

Alimentadores cegos são geralmente utilizados em níveis menores de projetos, ou o sistema de alimentação não permite o uso de alimentador atmosférico. (PASSINI 2005, p. 24-25).

O superdimensionamento do alimentador diminui as chances de falhas no fundido, porém acaba diminuindo o rendimento metálico. A eficiência dos alimentadores pode ser aumentada com a utilização de luvas ou tintas refratárias, que são colocadas na área de contato entre o metal e o molde ou entre o metal e a atmosfera. (PASSINI 2005, P. 25; PLUTSHACK; SUSCHIL, 1998)

O sistema de alimentação deve ser realizado anteriormente ao sistema de enchimento, pois deve-se conhecer o volume total que o metal deve preencher, sendo este volume formado pela cavidade e pelos alimentadores.

O sistema de enchimento é a rede de conduta que através dela o metal líquido entra no molde (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1998). Beeley (2001) afirma que este é o principal meio para controle do fluxo de metal no interior do molde, o autor também descreve quatro finalidades que os canais de alimentação devem cumprir.

(i) A taxa e a direção do fluxo de metal dever ser suficiente para o preenchimento completo do molde antes da solidificação. (ii) O fluxo deve ser suave e uniforme, com o mínimo de turbulência. (iii) Sua técnica deve permitir distribuição em uma temperatura ideal que permita o preenchimento total do molde. Deste modo a solidificação direcional favorece a alimentação. (iv) Os canais de alimentação podem possuir filtros para a separação de inclusões não ferrosas. (BEELEY, 2001)

No sistema mais simples de enchimento, o metal é derramado em um massalote, situado acima ou ao lado do fundido. Esta técnica é geralmente utilizada em pequenas peças fundidas, em que o fornecimento por mais de um canal reduz o rendimento do material visto que para peças pequenas a distribuição de temperatura é favorável e a distância percorrida pelo metal líquido é curta (BEELEY, 2001).

A figura 8 ilustra os componentes essenciais que um sistema comum de enchimento deve possuir. O metal é derramado na bacia (a), então ele passa pelo corredor de descida (b) até o nível requerido. Assim o metal preenche o corredor (c) que preenche os canais de entrada, e então o metal fundido entra na cavidade do molde. (BEELEY, 2001).

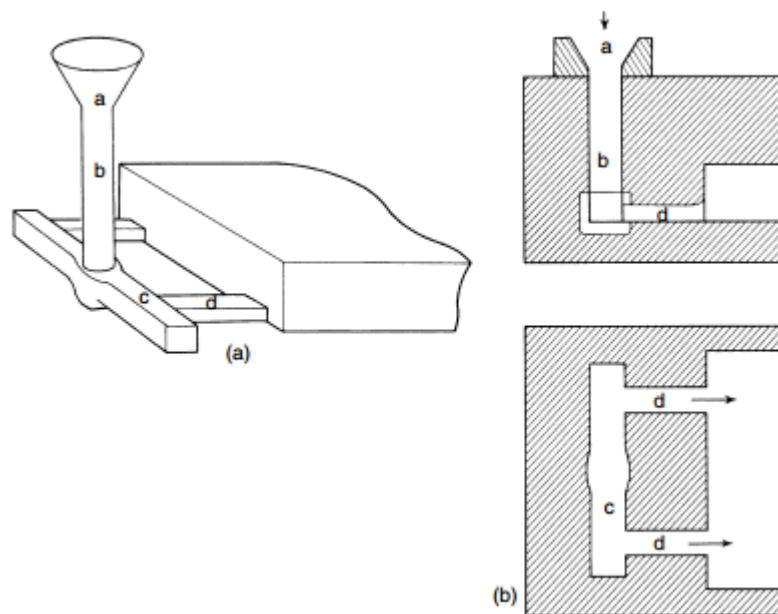


Figura 8 - Principais elementos de um sistema de alimentação.

Fonte: Beeley (2001)

O molde tende a sofrer mais com erosão quando o metal flui de forma turbulenta. Para que a turbulência seja eliminada a velocidade do fluxo de metal deve ser menor que a velocidade crítica, isto é conseguido através da combinação das propriedades do metal e as dimensões do molde. O balanço destas dimensões determina o tipo de escoamento, que é representado pelo Número de Reynolds (equação 1), onde (V) significa velocidade, (d) é a distância linear da seção do canal, e (ν) é a viscosidade cinemática do material. (BEELEY, 2001).

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (1)$$

Escoamentos turbulentos estão associados aos altos valores de (Re), normalmente sistemas turbulentos possuem valores entre 2000 e 4000. Para a fundição, a dimensão de passagem e velocidade mínima devem ser respeitadas para evitar a solidificação prematura, podendo existir então escoamento turbulento. Deste modo Beeley (2001) recomenda o uso de caminhos suaves para o líquido e taxas de escoamento mais baixas, compatíveis com o enchimento do molde.

Os estudos mais modernos de sistemas de enchimento são baseados em considerações de duas leis de mecânica dos fluidos. A primeira delas é a Equação da Continuidade, visto que a taxa volumétrica do escoamento é constante, então o sistema pode ser expresso pela equação (2), onde (Q) é a taxa volumétrica do escoamento, (A) está relacionado à área da seção de passagem do fluxo e (V) é a velocidade linear do fluxo. (BEELEY, 2001)

$$Q = A_1V_1 = A_2V_2 \text{ etc.} \quad (2)$$

A velocidade linear do escoamento está relacionada à segunda lei da mecânica dos fluidos que é o Teorema de Bernoulli, este diz que a energia total de uma unidade de fluido é constante através de um sistema. Deste modo considerando que o metal está em descanso no ponto inicial, e que a pressão neste ponto é atmosférica e desconsiderando o atrito do metal no molde, a velocidade em qualquer ponto pode ser determinada com relação a energia potencial em descanso. A velocidade de descida na base do corredor de descida fica relacionado a distância de caída do material (equação 3) (BEELEY, 2001).

$$V = \sqrt{2gh} \quad (3)$$

As características mais importantes para sistemas de enchimento individuais são as formas e as dimensões de passagem, que determinam a taxa e o tipo de escoamento, e a posição em que o metal entra na cavidade do molde em relação ao fundido. As características dimensionais do sistema podem ser expressos em termos de proporção, a : b : c, onde (a) é a área da seção transversal do corredor de descida, (b) é a área da seção transversal dos corredores e (c) é a área da seção transversal dos canais de entrada. (BEELEY, 2001)

Como dito anteriormente, canais de enchimento devem evitar a erosão do molde e garantir a solidificação direcionada do fundido, estes dois aspectos acabam impactando em uma grande variação de formas de configuração dos canais de alimentação. As principais variações de posicionamento dos canais estão ilustradas

na figura 9, e são conhecidas como canais superiores (a), canais inferiores (b) e canais laterais (c) (BEELEY, 2001).

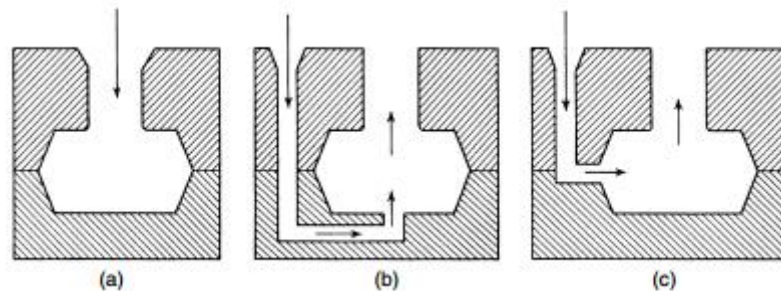


Figura 9 - Variação da posição dos canais.

Fonte: Beeley (2001).

Os sistemas de enchimento podem ser divididos em dois sistemas sistema convergente e sistema divergente. No sistema convergente a seção reguladora do fluxo do metal líquido se encontra na região de ataque. (extrangulamento). Para este sistema a velocidade do fluxo de metal líquido é maior nos canais de ataque, comparado com o canal de descida.

Para o sistema divergente, a seção reguladora se encontra na base do canal de descida, dessa maneira o fluxo de metal tem maior velocidade no canal de descida. A escolha entre um sistema convergente e divergente se faz pelo material que está sendo fundido. Para alumínio recomenda-se utilizar sistemas divergentes. (Nota de Aula – Processos Metalúrgicos de Fabricação)

Para o cálculo da velocidade conforme equação 3, deve multiplicar a raiz pelo coeficiente de perdas (α). Para este coeficiente recomenda-se valores entre 0,25 a 0,45 para sistemas de canais convergentes e valores entre 0,6 e 0,7 para sistemas de canais divergentes. (Nota de Aula – Processos Metalúrgicos de Fabricação)

Para o alumínio recomenda-se que as relações entre áreas dos canais de descida, distribuição e ataque, sejam respectivamente: (i) 1 : 4 : 4; (ii) 1 : 6 : 6, (iii) 1 : 2,2 : 2; (iv) 1 : 2 : 1; (v) 5 : 6 : 10. (Nota de Aula – Processos Metalúrgicos de Fabricação)

2.4 SIMULAÇÃO

Atualmente fabricantes estão mais prováveis a requerer fundidos de alta qualidade com entrega rápida e com baixo custo. Uma ferramenta para conseguir estes três objetivos na fundição é o uso de *softwares* de simulação (MUENPRASERTDEE pg 11, 2007).

Cientistas com o passar dos anos estudaram a ciência da fundição e da metalurgia, com isto desenvolveram teorias e modelos matemáticos para explicar as propriedades dos metais durante o processo de solidificação. Programas de simulação foram desenvolvidos a partir destes métodos com a utilidade de prever como o fundido ficará após processo. (MUENPRASERTDEE, pg 12 , 2007)

As ferramentas para simulação numérica do processo de fundição por gravidade disponíveis no mercado permitem a previsão dos fenômenos associados ao enchimento das cavidades, cita-se por exemplo, a previsão do caminho do fluxo metálico, o seu perfil de temperatura, de velocidade e pressão. Para os resultados associados à solidificação, destaca-se o perfil de solidificação propriamente dito, previsão de regiões propensas à incidência de porosidade, previsão de microestrutura final, propriedades mecânicas e tensões residuais (OLIVEIRA et al, 2003). Além de que a simulação pode prever aonde e quais defeitos podem ocorrer no fundido (MUENPRASERTDEE, pg 13 , 2007).

Os programas de simulação de fundição possuem diferentes formas de aproximar o cálculo e a previsão de saída do fundido. Cada método possui vantagens e desvantagens comparados entre eles. Entre os métodos de simulação existe os de Aproximação Numérica que podem ser divididos em Método de Elementos Finitos (FEM), ou o Método de Diferença Finita (FDM). FDM e FEM são os métodos mais comumente utilizados pelos desenvolvedores de softwares de simulação. Outra forma de aproximação pode ser a Aproximação Geométrica, utilizando o Método de K-Contour, proposto por Safaraz (1998). Existem vários outros métodos para esta finalidade. (MUENPRASERTDEE , 2007)

Oliveira et al. (2003) cita que, características como o tipo de processo de moldagem, a rigidez e compactação do molde, o tipo e composição da areia utilizada na confecção de moldes e machos, características do metal de base (forno cubilô, a arco, indução) e a forma de vazamento (manual ou automático), são algumas

variáveis que podem alterar completamente as características do fundido e por consequência influenciar diretamente na qualidade dos resultados de simulação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ABORDAGEM INICIAL DO PROBLEMA

As peças utilizadas para a realização deste trabalho são componentes de um motor Stirling tipo Gamma, que está sendo desenvolvido por um projeto de pesquisa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Os componentes fabricados são identificados como Base e Mancal, a figura 10 ilustra o conceito do motor que está sendo desenvolvido, juntamente com o conceito das peças produzidas por este trabalho, a Base (a) e o Mancal (b).

A peça Base tem a função de servir como suporte para conjunto, desta forma, ela tem que dar sustentação ao mancal, além de garantir a fixação do restante das peças que são acopladas a ela.

A peça Mancal tem a função de servir como suporte para o virabrequim e garantir o encaixe por interferência dos rolamentos, estes que garantem a rotação com fricção reduzida do virabrequim.

A escolha do processo de fundição como meio de confecção destas peças se deve pelo fato de possuírem geometrias complexas com detalhes internos, como é o caso da base, e pela facilidade de produção e reprodução da peça, após a confecção dos moldes e dos modelos.

3.2 ADAPTAÇÃO PARA FUNDIÇÃO

A fundição possui em suas vantagens a facilidade em conseguir fabricar peças com formatos complexos de forma mais barata e mais rápida que nos outros processos.

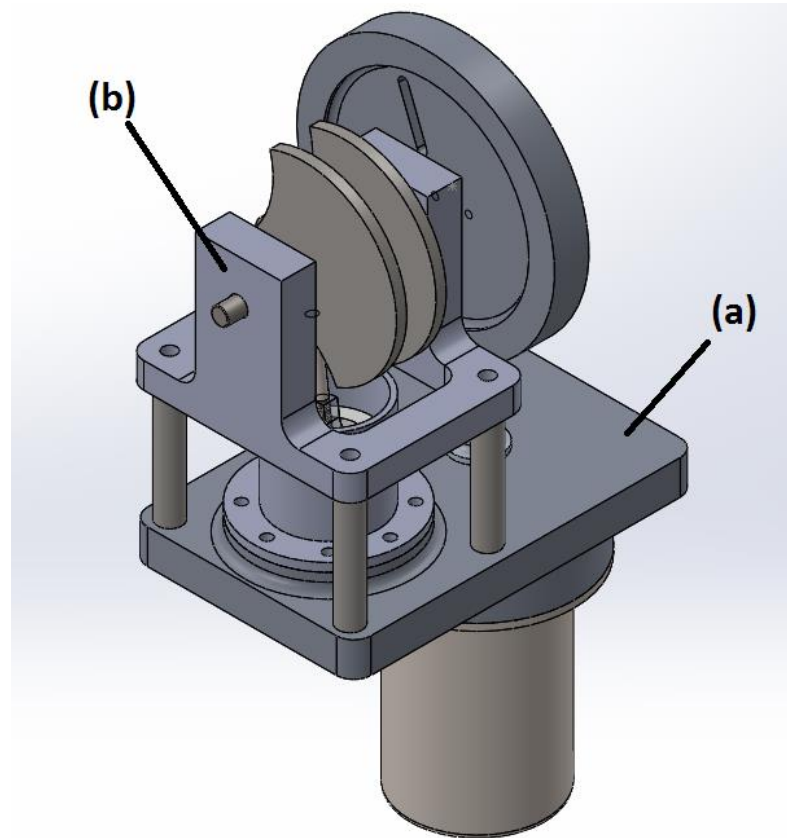


Figura 10 - Projeto Motor Stirling tipo Gamma.

Fonte: Autor

Porém, mesmo conseguindo produzir formas complexas, alguns ajustes devem ser realizados no projeto da peça para que esta seja produzida de forma eficiente, ou seja, com maior rendimento metálico possível, e que não possua defeitos de fundição, como vazios, empenamentos, além de que as dimensões de projeto devem ser respeitadas.

Desta forma foi realizado o estudo das peças a serem fundidas e identificado as mudanças que deveriam ser realizadas. Os formatos de algumas peças foram alterados para facilitar o modelamento do molde de areia, visto que por se tratar de fundição por modelo permanente, este deve ser removido sem que haja a deformação do molde, também foi considerado o ângulo de saída.

O arranjo básico das peças foi mantido, como posição dos furos, distância entre centros, entre outras dimensões, visto que as peças em questão fazem parte de uma montagem.

Contudo, é preciso conhecer os aspectos metalúrgicos do material que será fundido, visto que é sabido que metais sofrem contração volumétrica, desde

que são vazadas até o total resfriamento chegando a temperatura ambiente, e também deve ser respeitado as dimensões mínimas de seções.

Também deve ser respeitado a margem mínima de sobre metal para que seja realizado o acabamento da peça por usinagem.

A vista destes aspectos algumas dimensões do molde e do modelo se diferem das dimensões finais da peça. Todavia, esta diferença de dimensão está baseada em valores propostos por autores já conhecidos desta área de pesquisa e citados no capítulo de peças fundidas deste trabalho.

3.3 PROJETO E CONFECÇÃO DO FERRAMENTAL

O processo de fundição previsto para a produção das peças contempladas neste trabalho é a fundição em areia. Para a realização deste processo é necessário que seja fabricado as ferramentas que auxiliarão na modelagem e vazamento do metal líquido.

A primeira ferramenta a ser produzida deve ser o modelo da peça fundida, como dito anteriormente neste trabalho, o modelo pode ser considerado uma cópia em escala real da peça fundida, seu arranjo e dimensões seguem o que foi proposto no projeto de peças fundidas no capítulo anterior.

O modelo é bipartido pela linha de divisão e deve prever a colocação e fixação dos machos, além do arranjo dos sistemas de alimentação e enchimento.

Sua confecção deve ser realizada por meio de processos que permitam a elaboração de formas complexas.

Além da confecção do modelo, deve-se projetar e produzir os canais de enchimento e alimentação de maneira que o vazamento e solidificação ocorra sem o aparecimento de falhas, com o preenchimento completo da cavidade, com solidificação sem o aparecimento de rechupes.

Com o as metades bipartidas dos modelos e os respectivos canais produzidos, fabrica-se a placa de fundição, que neste caso será do tipo “*match-plate*”.

Para projeto dos ferramentais de fundição, que engloba o projeto dos canais de enchimento e alimentação, e determinação do tamanho de macho com as marcações de macho, utilizou-se as notas de aula feitas pelo autor deste trabalho na matéria de Processos de Fabricação.

Nota-se pela sequência demonstrada na figura 11 que as duas partes do modelo são moldadas separadas, neste caso primeiramente a parte inferior (a), posteriormente é realizada a socagem da parte superior (b), e fechamento do molde após o modelo ser retirado.

Pelo fato das duas partes da caixa serem moldadas separadamente, as placas devem ser produzidas de modo a facilitar ao máximo o processo de moldagem, por isso as placas devem possuir sistemas de referenciamento.

O referenciamento serve para garantir o casamento linear entre as duas metades do molde. A figura 11 ilustra através de três passos como é realizado a moldagem por meio de placas do tipo “*matchplate*”.

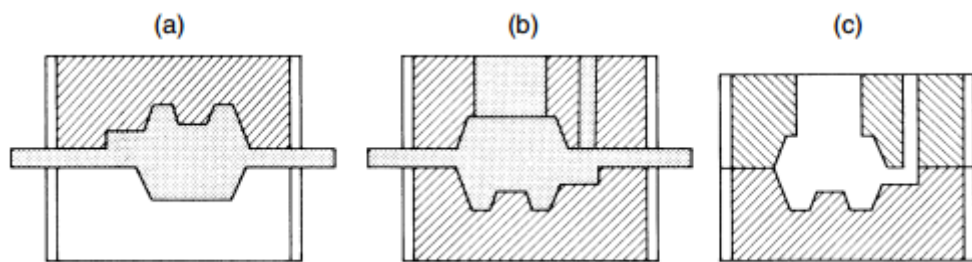


Figura 11 – Moldagem a parti de modelo *matchplate*.

Fonte: Beeley (2001)

A metade superior da placa deve possuir o massalote, a metade superior do pescoço de alimentação, o funil de enchimento, com a metade superior dos canais de distribuição e ataque.

A metade inferior da placa deve possuir o domo inferior do massalote e do funil de enchimento, além da metade inferior do pescoço de alimentação e as metades inferiores dos canais de alimentação e enchimento.

3.4 SIMULAÇÃO

Para a realização da simulação, é necessário possuir todo o projeto do fundido, pois a simulação permite uma aproximação apurada de o que vai ocorrer durante a solidificação.

Como é possível realizar a simulação, a peça não precisa ser fundida para analisar a ocorrência das falhas. Desta maneira, ocorre na simulação a identificação de falha e conseqüentemente as alterações de projeto.

Com a realização da simulação uma série de arranjos podem ser testados e aperfeiçoados de uma forma interativa. O produto final após a simulação é o projeto do fundido com canais e massalotes, com uma redução na possibilidade de defeitos de fundição.

O software de simulação utiliza uma série de informações fornecidas pelo usuário, essas informações variam desde material utilizado até tamanho de caixa e tipo de molde.

Para melhorar o resultado da simulação, deve-se utilizar a quantidade máxima de parâmetros necessários, essas informações devem ser precisas, pois parâmetros iniciais diferentes do real, irão fornecer resultados também distantes do real.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1 ADAPTAÇÃO PARA FUNDIÇÃO

As geometrias das peças foram reconfiguradas visando o melhor aproveitamento metálico e prevendo possíveis falhas de solidificação para serem corrigidas, o ponto ótimo entre os parâmetros aproveitamento metálico e eliminação de falhas foram buscados. A figura 12 apresenta o conceito que a peça nomeada Base necessita após o final de sua fabricação.

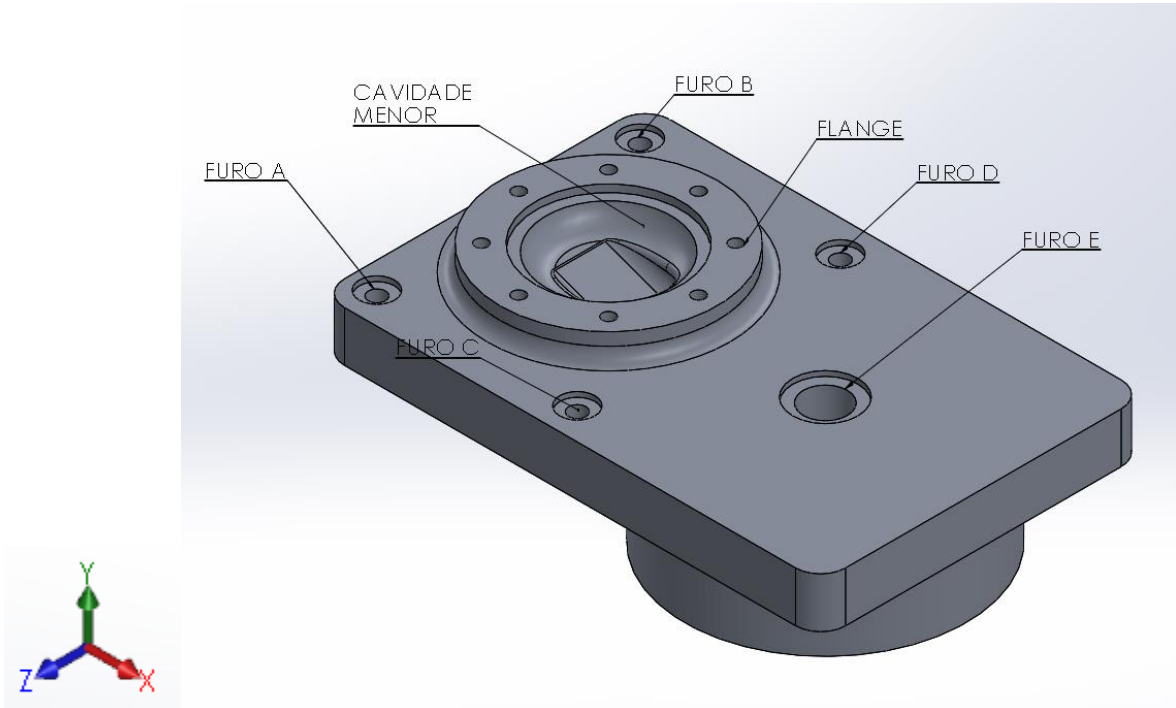


Figura 12 - Conceito de geometria da peça Base. Fonte: Autor

A dimensões, espaçamento, alturas do topo, profundidade, quantidade e formato dos furos foram pré-definidos com base em todo o projeto do conjunto que esta peça faz parte, deste modo suas configurações não foram alteradas.

Como explicado anteriormente no tópico sobre abordagem inicial do problema a peça necessita de duas cavidades e um canal de ligamento interno entre as duas. A figura 13 representa o conceito da peça Base cortada no plano longitudinal ao canal.

O desenho técnico do conceito da peça Base está nos apêndices deste trabalho.

Para começar a adaptação geométrica da peça Base, planos para repartição da peça foram avaliados. Os critérios levados em consideração foram aproveitamento metálico, simetria, fabricação do modelo, tudo isso aliado aos critérios de projeto que a peça deve obedecer.

Deste modo, pela facilidade de posicionamento dos machos, simetria conseguida entre as duas metades do modelo, possibilidade de cumprir com todos os critérios de projeto, o plano para a linha de repartição da peça base foi o plano expresso na Figura 13, plano que corta o canal e cavidades ao meio.

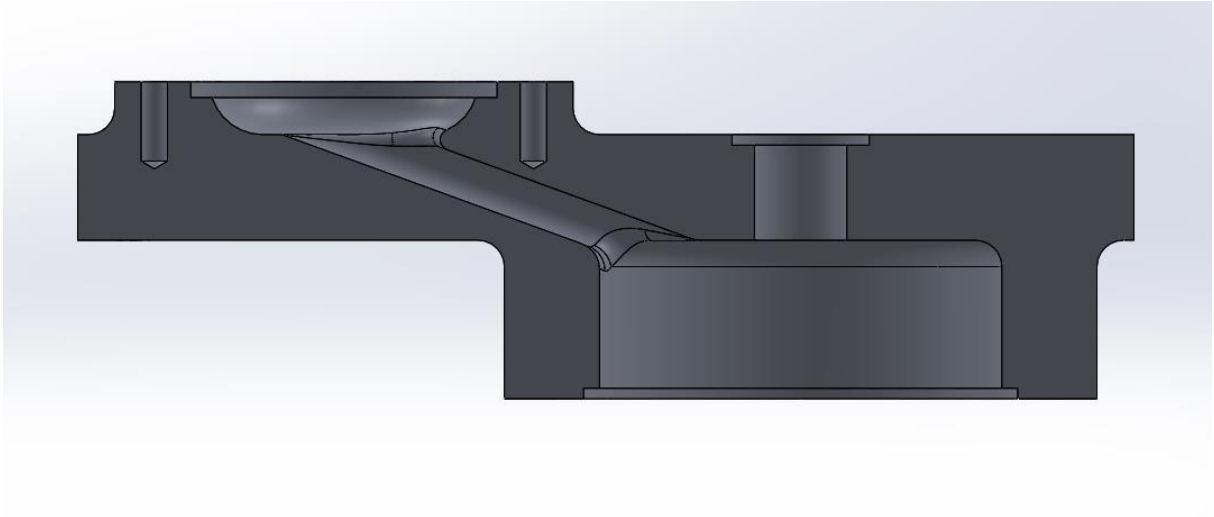


Figura 13 - Conceito do arranjo interno da peça Base.

Fonte: Autor.

Para a utilização deste plano o modelo precisou ser bipartido, e neste caso a simetria é garantida, porém de forma espelhada.

A partir do momento que a linha de repartição é estabelecida, as alterações geométricas da peça precisaram ser alteradas de acordo com a localidade da linha de repartição.

A superfície externa da peça deve permitir e facilitar a retirada do modelo da caixa de moldagem sem que ocorra defeito no molde, assim, toda a superfície externa no modelo possui um certo grau de afunilamento na direção oposta e normal ao plano de repartição.

Chiaverini (1986) chama este afunilamento de ângulo de “saída” e conforme suas recomendações utilizou-se ângulo de 3° para as superfícies externas do material.

A figura 14 mostra a utilização do ângulo de saída em algumas paredes do modelo, assim como a figura 16 apresenta a escolha de superfícies no formato cilíndrico, visto que este não necessita de ângulo de saída. Faces com inclinação acentuada também possuem ângulo de saída iguais ou maiores a 3° .

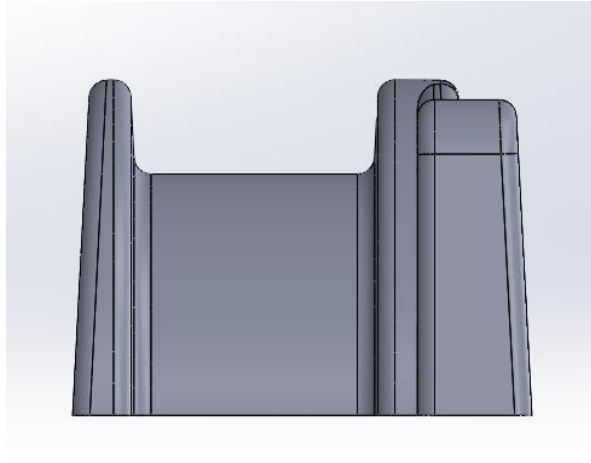


Figura 14 - Vista lateral do modelo.

Fonte: Autor

A figura 14 mostra a utilização do ângulo de saída em algumas paredes do modelo, assim como a figura 15 apresenta a escolha de superfícies no formato cilíndrico, visto que este não necessita de ângulo de saída. Faces com inclinação acentuada também possuem ângulo de saída iguais ou maiores a 3° .

O modelo adaptado para fundição além de obedecer aos fatores geométricos referentes à moldagem, sua geometria deve atender fatores relacionados à metalurgia do material, com o propósito de eliminar falhas de fundição.

Deste modo buscou-se a transição entre seções diferentes de forma leve, sem mudanças muito grandes em distâncias pequenas, afim de manter a menor diferença entre taxas de resfriamento em seções próximas e que esta diferença tenda sempre ser menor nas extremidades do molde.

Visando a taxa de solidificação e as tensões internas de resfriamento todos os cantos possuem arredondamentos, estes variaram de acordo com a necessidade e a utilidade que a região que ele se encontra possui.

Por exemplo, como pode ser visto na figura 15 comparando com a peça conceito, figura 12, o modelo passou a ter transições de seção arredondadas. A posição em que serão realizados os furos A, B, C, D, E continuam no mesmo plano, porém ao redor do furo E, todo o material foi reduzido, exceto a ligação entre o furo E com a superfície dos demais furos.

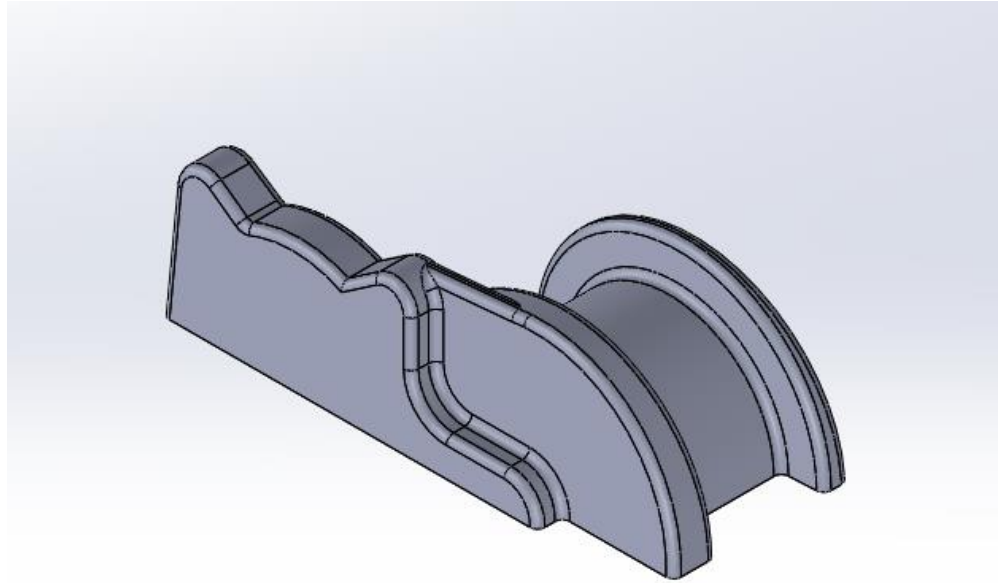


Figura 15 – Vista perpendicular do modelo.

Fonte: Autor.

A remoção de material foi realizada visando a economia do mesmo, e o mantimento da seção entra a superfície dos demais furos e o furo E se fez pelo fato da continuidade de seção para melhor alimentação da peça.

Além de todas as mudanças geométricas realizadas na peça, houve algumas alterações dimensionais, que precisaram ser consideradas visando a contração do material após a solidificação e resfriamento e as tolerâncias mínimas de usinagem.

Para que a contração térmica do material não seja problema foi adotado um aumento em 4,5% em todas as dimensões que sofrem com a contração. E além do aumento das dimensões devido a contração térmica, foi adicionado material em todas as superfícies que receberão acabamento posterior. O aumento de cada dimensão seguiu os dados da tabela 3 deste trabalho.

A outra peça abordada neste trabalho é a o Mancal, o conceito da peça está na figura 16. Como explicado na seção sobre abordagem inicial do problema, o mancal deve permitir a fixação dos rolamentos assim como suportar o eixo do conjunto.

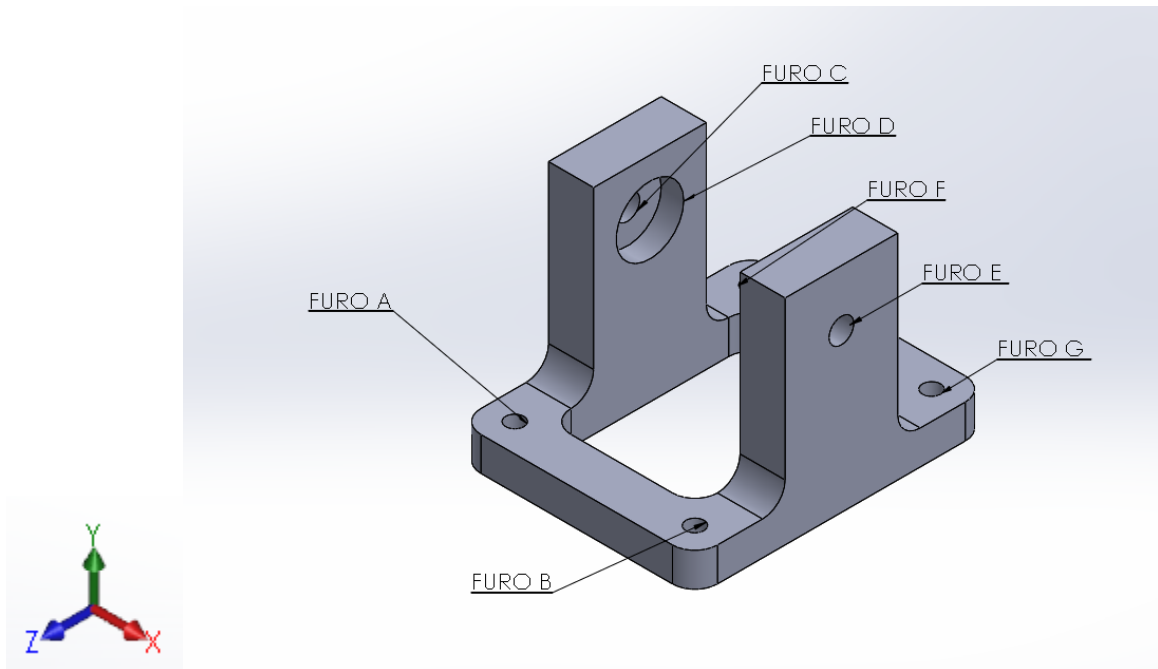


Figura 16 - Conceito peça Mancal.

Fonte: Autor.

Do mesmo modo que a primeira peça, as dimensões, espaçamento, alturas do topo, profundidade, quantidade e formato dos furos e algumas características geométricas foram pré-definidos com base em todo o projeto do conjunto que esta peça faz parte e deste modo não foram alterados.

A figura 17 especifica cada um dos furos com letras afim de facilitar a compreensão do texto. As medidas de projeto para estes furos estão nos apêndices deste trabalho, juntamente com o desenho técnico desta peça.

A peça Mancal além das configurações dimensionais definidas em projeto, deve possuir um arranjo geométrico semelhante ao de seu conceito, visto que outras peças do conjunto são acopladas à mesma e outras movimentam-se em distâncias próximas.

Assim como a peça Base o primeiro passo foi a seleção do plano da linha de repartição, para esta peça o plano de repartição escolhido foi o plano que intercede o centro dos furos C D E sendo paralelo ao plano XY de acordo com a Figura 16.

Este plano foi selecionado pela facilidade de remodelagem para a fundição, aproveitamento metálico, além de garantir os critérios pré-estabelecidos de projeto. Com a utilização deste plano foi possível a simetria da peça entre as duas metades do modelo bipartido.

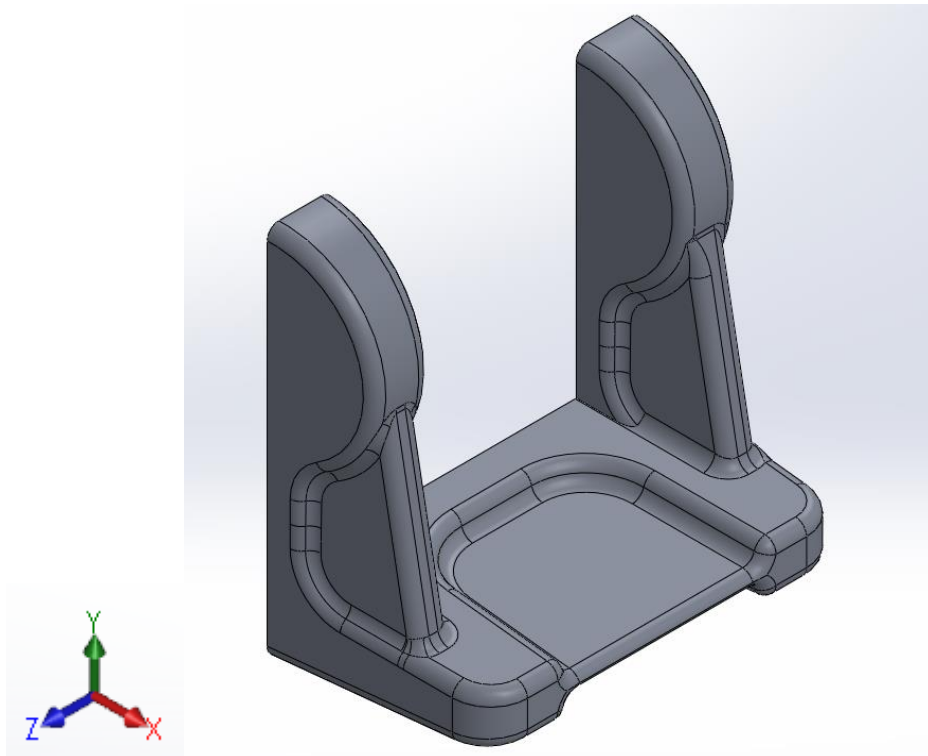


Figura 17 - Modelo bipartido da Peça Mancal.

Fonte: Autor.

A figura 17 esquematiza as alterações geométricas realizadas na peça Mancal, é possível perceber a o uso de superfícies arredondadas, a eliminação de cantos vivos, assim como mudanças de seção de forma suave.

Para esta peça também foi utilizado ângulo de saída de 3° nas superfícies perpendiculares ao plano da linha de partição. A figura 20 demonstra de forma mais clara a aplicação desta técnica em algumas superfícies desta peça.

De acordo com a figura 18, que representa o conceito desta peça, a peça fundida deve permitir a usinagem dos furos A, B, F e G, e que estes furos possuam o distanciamento entre eles descrito no projeto. Para isso foi mantida a superfícies lisas nas extremidades da peça.

A diminuição de material entre as superfícies dos furos na direção Z (figura 17) foi realizado com o propósito de melhorar o aproveitamento metálico da peça. O aumento da espessura próxima a linha de partição foi utilizado para eliminar possíveis problemas de alimentação da peça durante a fundição.

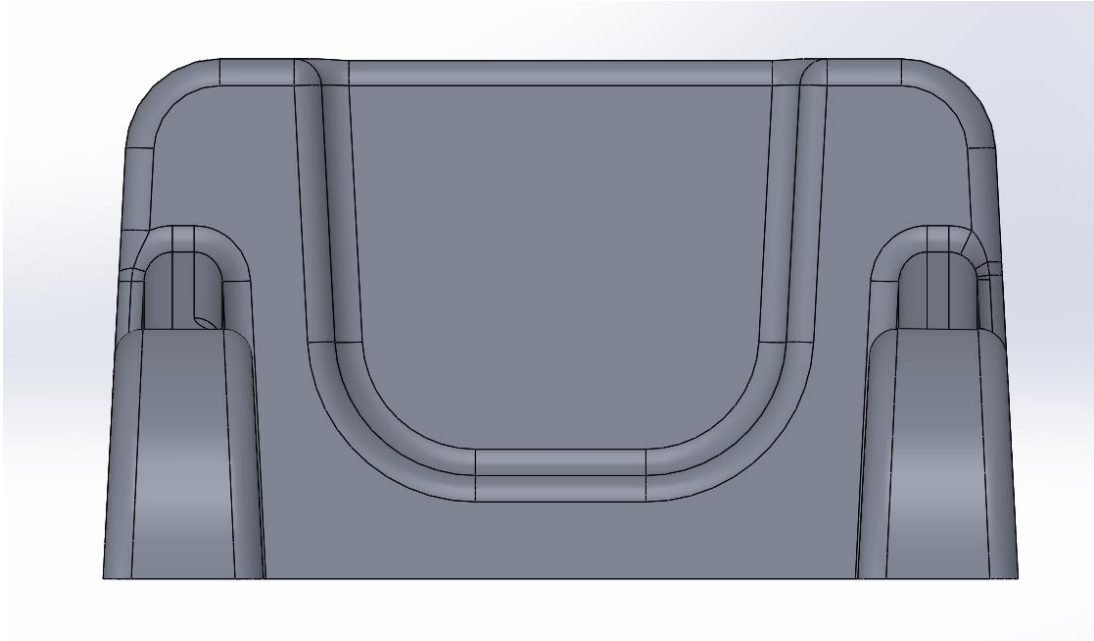


Figura 18 - Vista frontal do modelo bipartido.

Fonte: Autor.

As nervuras foram utilizadas nesta peça com o intento de proporcionar rigidez à peça e ao mesmo tempo melhorar o aproveitamento metálico da mesma. Deste modo foram adicionadas simetricamente quatro nervuras, duas em cada metade do modelo bipartido.

Comparando o modelo da peça mancal com o conceito apresentado na figura 18, nota-se que o modelo é totalmente preenchido por material em sua base, diferentemente do conceito, que possui uma cavidade retangular em seu centro.

A escolha pelo preenchimento desta área com material se deve pelo fato de que para a fundição em areia, as peças devem possuir seções contínuas a partir do plano de partição, visto que ao contrário seria necessário a utilização de macho para garantir a cavidade retangular.

Deste modo, optou-se por manter a continuidade da seção sem a utilização de macho e a cavidade ser realizada no momento do acabamento.

4.2 FABRICAÇÃO DOS MODELOS

A partir do momento que a remodelagem das peças terminou foi necessário a fabricação dos modelos, assim foi levantado quais as formas de

fabricação possíveis de acordo os equipamentos que o laboratório da COEME possui.

Qualidade dimensional, acabamento superficial, foram fatores levantados durante a seleção do modo de fabricação destas peças.

Deste modo para a peça Base foi escolhido como forma de fabricação, a usinagem através do centro de usinagem CNC. A seleção deste modo de fabricação aconteceu pelo fato da peça possuir formato complexo, e este método de fabricação garante a fabricação destas formas com exatidão geométrica e dimensional.



Figura 19 - Modelo bipartido da peça Base após usinagem no centro de usinagem CNC.

Fonte: Autor.

O material utilizado para a fabricação das duas metades bipartidas do modelo da peça Base foi madeira de eucalipto.

Para a usinagem foi utilizado como ferramenta de usinagem, uma fresa de faceamento e desbaste de 20 mm para o faceamento e desbaste. Uma fresa de topo com 10mm para o acabamento.

O sistema utilizado para programação e análise da usinagem CNC foi o Edgecam 2012.

A programação da usinagem previu a usinagem de duas metades semelhantes, porém espelhadas em relação ao plano de partição em uma mesma placa, como mostra a figura 19. Esta técnica foi escolhida visando a economia de tempo e exatidão dimensional.

O código gerado pelo pós-processador teve 120 mil linhas e a usinagem do bloco de madeira até as duas metades do modelo bipartido demorou 22 horas. Além de que após a usinagem, a placa com as duas metades da peça base apresentou um ligeiro empenamento.

Para a produção do modelo da peça Mancal foi selecionado como forma de fabricação a prototipagem rápida por meio de impressão 3D. A seleção da impressão 3D se deve pelo fato da peça ter dimensões pequenas e pela possibilidade de fabricar os formatos complexos da peça com exatidão dimensional em um período de tempo consideravelmente curto quando comparados com os outros processos.

A máquina utilizada para a fabricação do modelo foi a impressora 3D Cube Printer, segunda geração, com a configuração superfino. A figura 20 mostra o momento da impressão 3D deste modelo e na figura 24 é possível ver como o modelo ficou depois de finalizado.

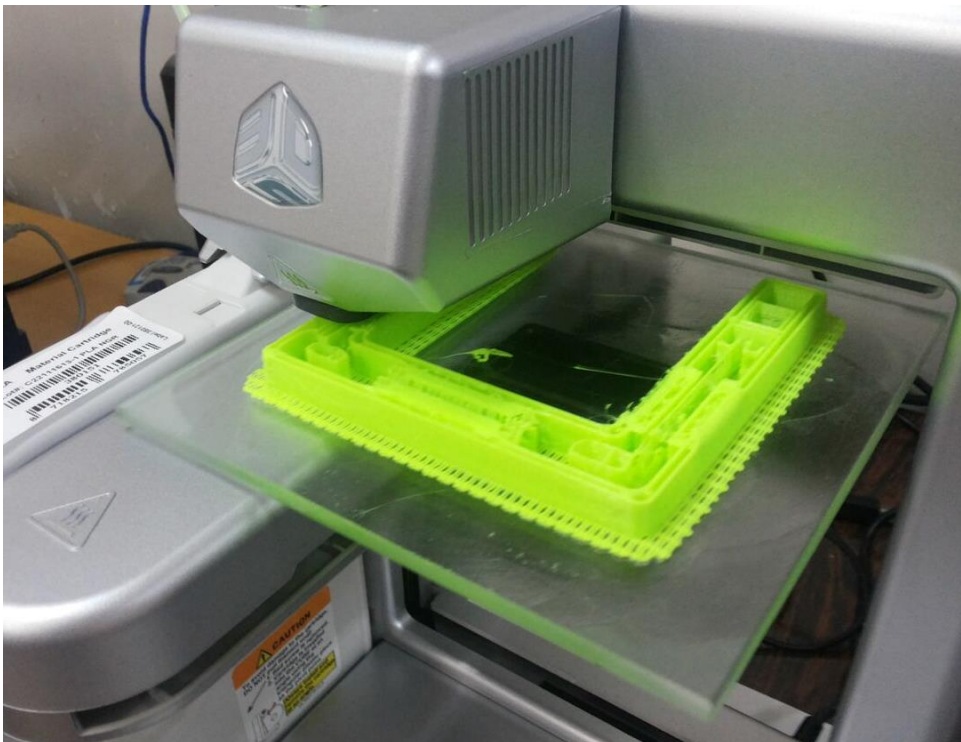


Figura 20 - Impressão 3D da peça Mancal.

Fonte: Autor.

4.3 SISTEMA DE ENCHIMENTO E ALIMENTAÇÃO

O projeto para determinação do sistema de enchimento e alimentação das peças, iniciou-se a partir da determinação das geometrias das peças. Com isso, os parâmetros de volume e área superficial seguiram como guia para o cálculo e posicionamento destes sistemas.

Para o cálculo dos sistemas de enchimento, foi realizado o estudo das peças por meio da Regra de Chvorinov. As peças foram divididas em partes, de acordo com as diferenças de seção que possuíam, seu módulo de Chvorinov foi calculado para cada uma das partes, com o intuito de conhecer os pontos quentes.

Isto posto, a figura 22 mostra como as peças foram divididas para o cálculo do módulo de Chvorinov.

Foi estipulado um tempo de 7 segundos para o enchimento completo das cavidades do molde. Deste modo foi encontrado a vazão volumétrica dos canais de enchimento.

$$Q = \frac{Vol}{t} \quad (4)$$

Para o cálculo das áreas do sistema de canais foi considerado que se tratava de um sistema divergente, assim $\alpha = 0,65$. A velocidade do metal líquido nos canais segue a equação 4:

$$V = \alpha \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (5)$$

Tabela 3 - Parâmetros calculados para sistema de enchimento

	Base	Mancal
Vol [m ³]	5,00E-04	2,60E-04
t [s]	7	5
Q [m ³ /s]	7,14E-05	5,20E-05
α	0,65	0,65
g [m/s ²]	9,81	9,81
H [m]	0,1	0,1
V [m/s]	0,910464	0,910464
A [m ²]	7,85E-05	5,71E-05

Fonte: Autor

O parâmetro H, conhecido como altura efetiva dos sistemas de canais de vazamento, foi calculada com base nas alturas do modelo bipartido e da caixa, seus valores estão contidos na tabela 3.

Desta maneira fica conhecido o valor da velocidade do canal de decida, a tabela 3, traz esses valores para ambas as peças.

Utilizando o valor de velocidade do canal de decida com a vazão volumétrica encontrada a partir da equação 3, foi encontrado a área mínima que a seção transversal do canal de descida deve possuir.

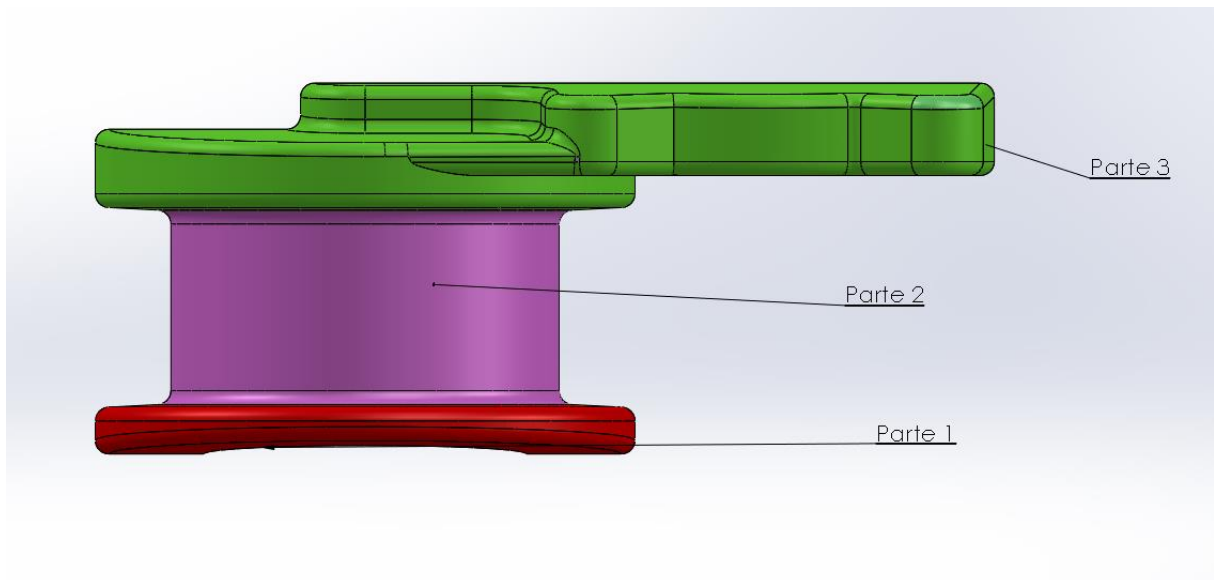


Figura 21 - Divisão da peça Base para cálculo de Chvorinov

Fonte: Autor.

Desta forma pela lei da continuidade ficou conhecida a área do canal de descida e pela proporção 1:4:4 recomendada para as ligas de alumínio, determinou-se a área necessária para os canais de distribuição e ataque.

O sistema de alimentação, formado pelo massalote e pescoço, tem a função de fornecer metal para os pontos quentes, estes que são os últimos a se solidificar, desta maneira o massalote deve se solidificar posteriormente ao ponto quente para ter sua função completa.

A tabela 4 traz os valores do Módulo de Chvorinov de acordo com as seções da peça Base, que estão divididas de acordo com a figura 21. Desta maneira foi identificado que o ponto quente da peça se encontra na seção nomeada de parte 3.

Tabela 4 - Módulo de Chvorinov de acordo com as seções da peça Base

	Volume [cm ³]	Área Superficial [cm ²]	Módulo de Chvorinov [cm]
Parte 1	82,8	1600	0,05175
Parte 2	10,1	2100	0,0480952
Parte 3	35,6	4200	0,0847619
Peça Base	54,0	7900	0,0683291

Fonte: Autor

Porém esta peça pode apresentar rechupes também na parte 1, desta maneira o massalote foi posicionado em contato com a parte 1, e os canais de ataque foram alargados para que o sistema de enchimento forneça material para a parte 3 durante a solidificação.

Desta maneira a peça tenderá a solidificar primeiramente a parte 2, conseqüentemente a parte 1, que será realimentada pelo sistema do massalote, e por fim solidificará a parte 3, que será realimentada pelo sistema de enchimento da peça.

Tabela 5 - Módulo Chvorinov de acordo com as seções da peça Mancal.

	Volume [cm ³]	Área Superficial [cm ²]	Módulo de Chvorinov [cm]
Parte 1	64,05	830	0,0771084
Parte 2	7,10	160	0,044375
Parte 3	10,3	136	0,0757353
Parte 4	19,5	480	0,0395833
Peça Mancal	26,3	483	0,05445135

Fonte: Autor

A tabela 5 traz os valores do módulo de Chvorinov de acordo com as seções da peça Mancal, que estão divididas de acordo com a figura 22. Nota-se que a seção com maior Módulo de Chvorinov, que conseqüentemente será a última a se solidificar é a parte 1.

Desta maneira o sistema de alimentação deve estar ligado a esta seção, percebe-se que a parte 3 da peça mancal possuiu um valor de módulo bem parecido com o valor encontrado na parte 1.

Porém para este caso, no centro da peça, local que onde o rechupe tende se formar, o material será removido no processo de acabamento, assim o rechupe será eliminado.

Então será realizado a tentativa de realimentar com massalote apenas a parte 1.

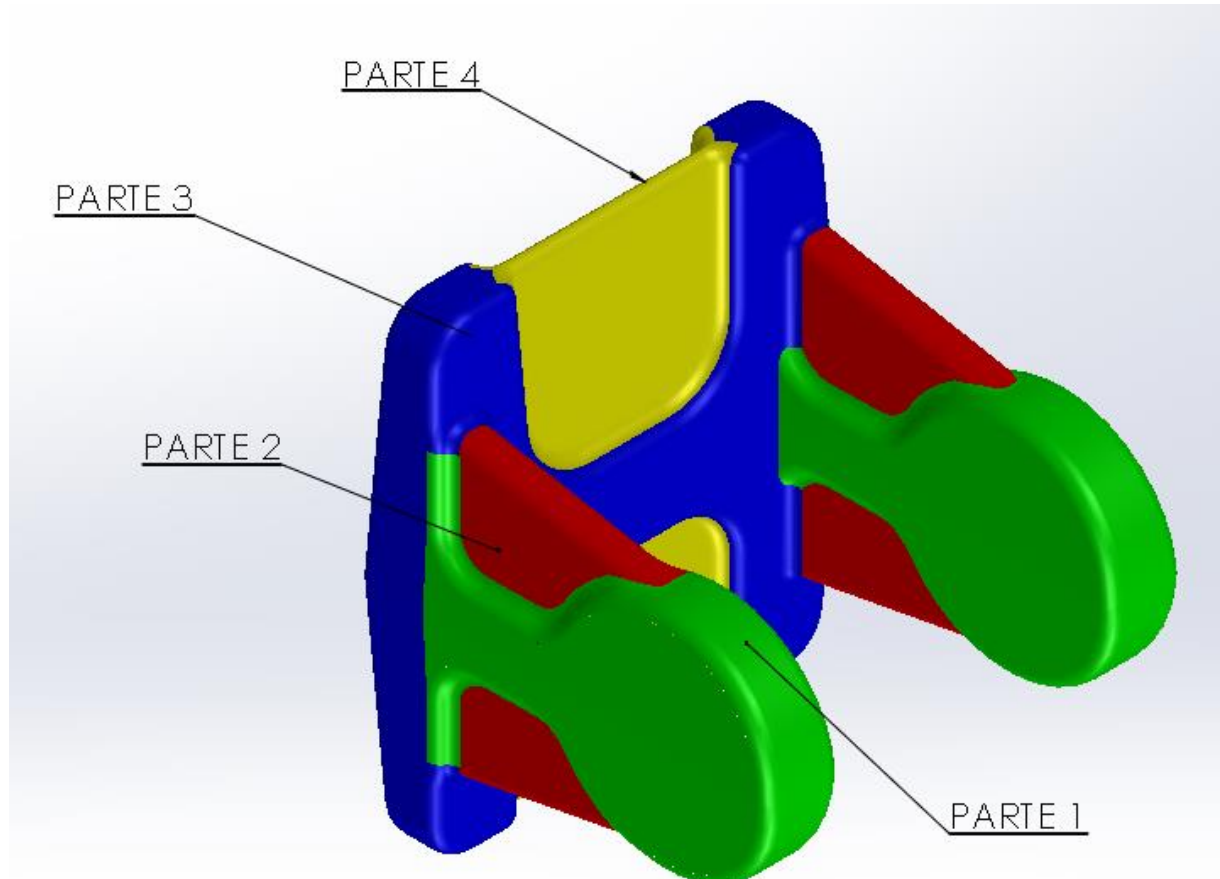


Figura 22 – Divisão da peça mancal para o cálculo de Chvorinov

Fonte: Autor

Com os pontos quentes e posição dos massalotes definidos, foi projetado as dimensões dos massalotes. Este que deve se solidificar após o restante da peça, desta maneira o Módulo de Chvorinov deve ser maior que as seções da peça.

Assim, temos que o módulo de Chvorinov deve ser maior que o restante da peça, desta maneira, por nota de aula, recomenda-se para ligas de alumínio que o módulo de Chvorinov seja 14% maior que o maior módulo da peça. Assim, utilizamos a equação x para o cálculo do Módulo de Chvorinov do massalote.

$$Mm = k.M \rightarrow k = 1,14 \quad (6)$$

Desta maneira, foi encontrado o Módulo de Chvorinov para ambas as peças. A tabela 6, apresenta esses valores.

Com os valores do módulo do massalote e utilizando a equação 6, foi encontrado o valor do diâmetro do massalote. O valor de p escolhido foi de 2.

$$D = M_m \cdot \frac{2 + 4p}{p} \quad (7)$$

Tabela 6 - Valores de cálculo dos Massalotes

	Mancal	Base
M	0,0077	0,0084
k	1,4	1,4
Mm [cm]	0,01078	0,01176
p	2	2
D [cm]	5,39	5,88
Mn [cm]	0,0924	0,01008
a [cm]	3,696	04,032

Fonte: Autor

A altura mancal foi estabelecida em função da altura do modelo bipartido, em ambos os casos, a altura dos massalotes ficou maior que a altura do modelo bipartido.

Para o cálculo do pescoço de alimentação inicialmente foi calculado o módulo que o pescoço deve possuir, este que conforme equação 8, deve ser a média aritmética entre o Módulo Chvorinov da peça e do massalote.

$$M_n = \frac{M_m + M}{2} \quad (8)$$

Considerando o pescoço um cubo, o valor da aresta do mesmo segue a equação 9.

$$a = 4 \cdot M_n \quad (9)$$

Os valores calculados para o massalote e pescoço de alimentação estão contidos na tabela 5.

Com o sistema de alimentação e enchimento calculados e determinados, foi realizado a esquematização destes sistemas, como mostra a figura 23.

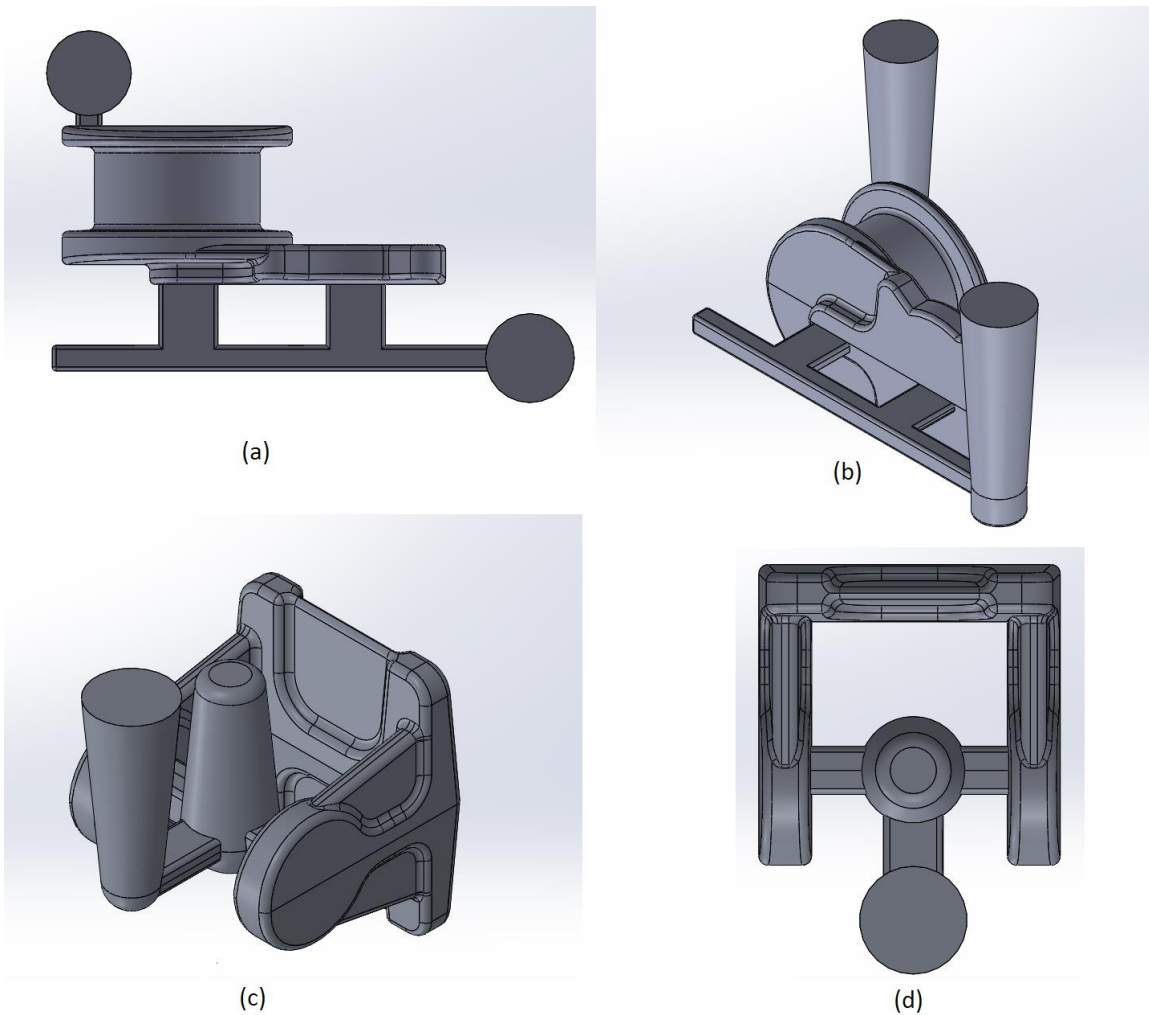


Figura 23 - Sistema de Enchimento e alimentação. (a) Vista superior peça Base; (b) Vista isométrica peça Base; (c) Vista isométrica peça Manca; (d) Vista superior peça Manca.

Fonte: Autor

Note que no sistema da peça Manca, o funil de enchimento e o massalote estão ligados diretamente e que os canais de ataque fazem o papel do pescoço de alimentação.

A partir do projeto de canais realizado, o próximo passo foi a construção das placas para a moldagem da fundição. Neste caso foi utilizado placa do tipo *match-plate*.

As placas e os sistemas de enchimento e alimentação foram fabricados em madeira. A figura 23 mostra o arranjo.

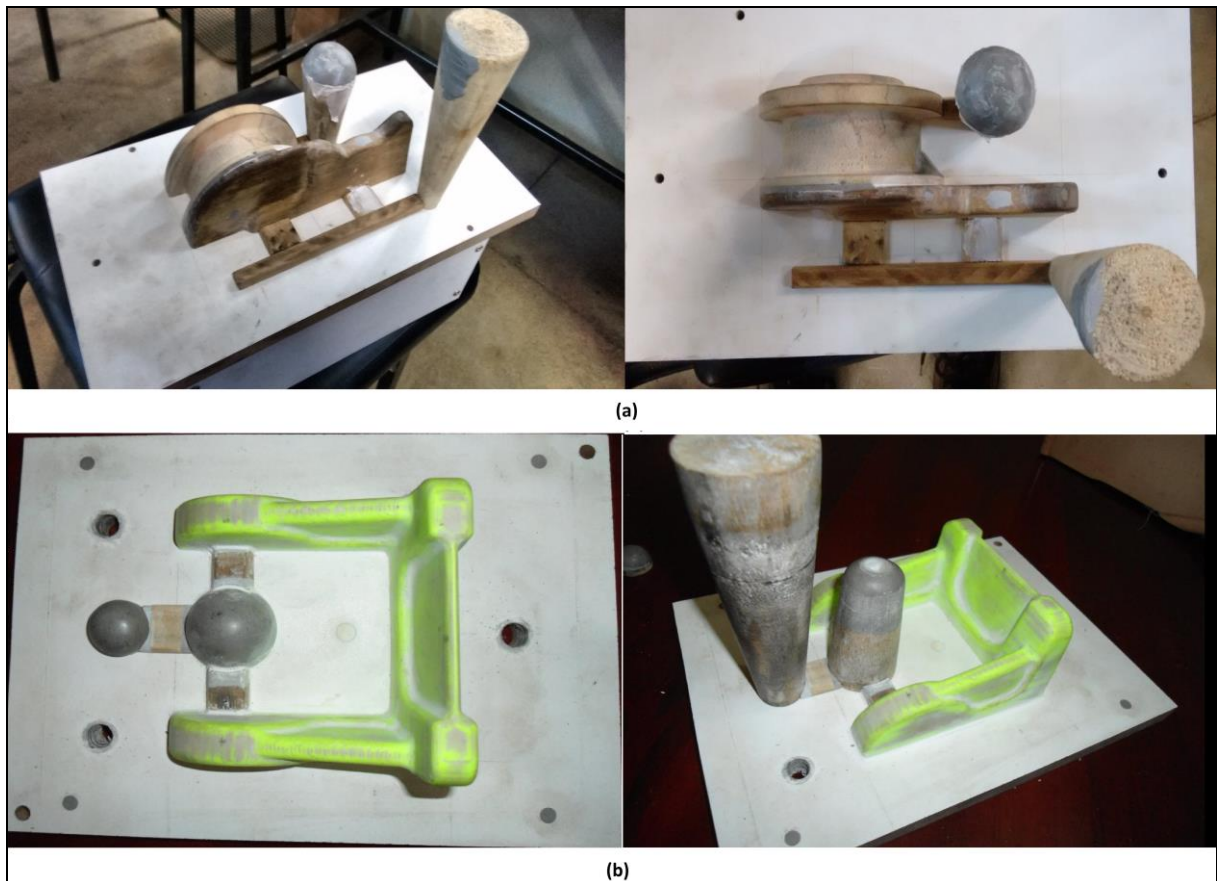


Figura 24 - Placas para moldagem . (a) Placa de moldagem para a peça Base; (b) Placa de moldagem para a peça Mancal.

Fonte: Autor

Cada lado da placa da peça Base possui uma metade do modelo bipartido, como mostrado na Figura 23 (a). Um lado da placa possui o funil de enchimento ligado aos canais de distribuição e ataque e o sistema de alimentação, constituído pelo massalote e pescoço de alimentação.

O outro lado da placa da peça Base, que consiste no arranjo inferior da caixa de fundição é constituído pela forma de domo do funil de enchimento, ligado a metade inferior dos canais de distribuição e ataque. Similarmente ao sistema de enchimento, o sistema de alimentação da placa inferior possui o domo do massalote e a metade inferior do pescoço de alimentação.

Para a placa da peça Mancal foi feito o mesmo procedimento realizado na placa da peça Base. Porém por se tratar de uma peça simétrica foi fabricado apenas uma metade do modelo bipartido, e neste caso os canais são desmontáveis.

O arranjo para a peça Mancal, ficou da seguinte forma, na placa superior possui o funil de enchimento, massalote e a metade superior dos canais de ataque.

Já na placa inferior, possui os domos do funil de enchimento e massalote, e a metade inferior dos canais de ataque.

4.4 SIMULAÇÃO

Foi realizada a simulação dos arranjos, para isto foi utilizado a versão estudantil do software SOLIDCast®, desenvolvido pela empresa Finite Solutions. Para a realização do estudo, fui utilizado os arranjos de modelo e canais desenvolvidos até o momento neste trabalho, fui incorporado ao software, arranjos muito parecidos com os arranjos da Figura 23, presente na seção anterior.

Foi analisado o posicionamento dos pontos quentes como mostra a Figura 25, a escala ao lado está relacionada ao tempo de solidificação em minutos que levará para a peça solidificar.

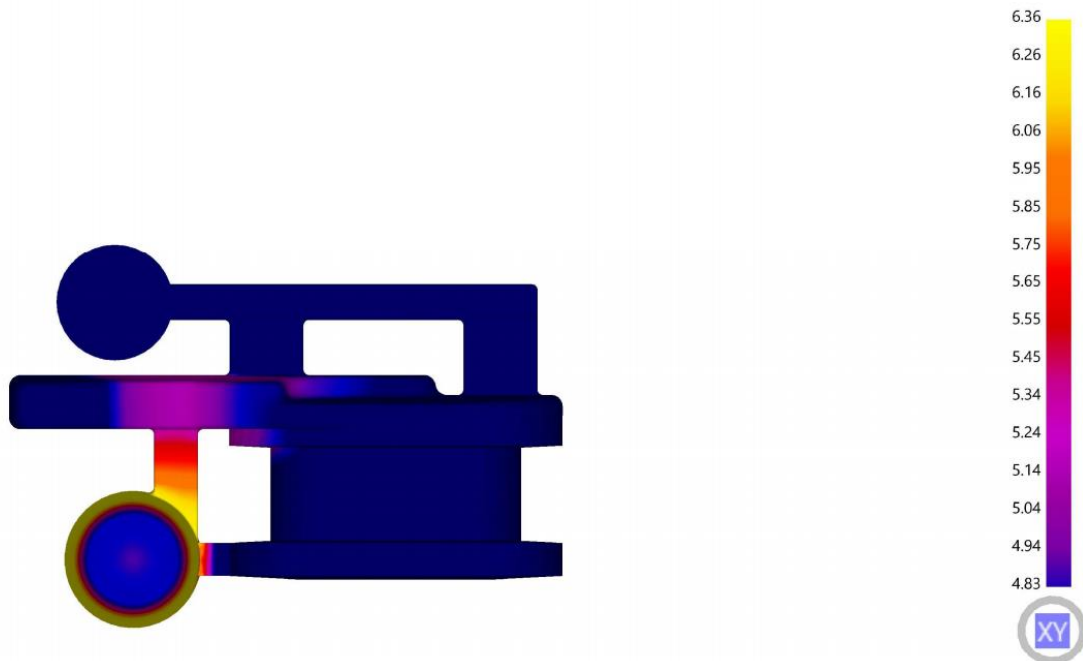


Figura 25 - Análise do tempo de solidificação

Fonte: Autor

É possível perceber pela figura acima que os pontos de solidificação mais lenta na peça estão próximos ao massalote, este também é possível notar que será o último a solidificar. Também foi realizado a simulação de solidificação que identifica os rechupes durante a solidificação.

4.5 FUNDIÇÃO

Após a fabricação dos ferramentais de fundição, objetivo principal deste trabalho, foi realizada a fundição dos componentes. Para isso foi utilizada as caixas e placas de fundição, além dos machos.

As caixas foram fabricadas com tamanho que caiba o conjunto de ferramentas do componente em questão, desta maneira as caixas foram colocadas sobre as placas e a areia foi socada sobre a placa. Após isto a placa foi retirada e o molde foi para a cura. O processo de cura realizado, foi a cura a frio.

Este processo foi realizado para cada metade dos modelos, as placas já contavam com um sistema de referenciamento para facilitar a união e coincidência das duas metades no momento da fundição.

O material utilizado para fundição foi a liga de alumínio-silício 380. O alumínio foi aquecido até a temperatura de fundição adequada para o derramamento. Após a temperatura adequada, foi realizado o derramamento do material no molde.

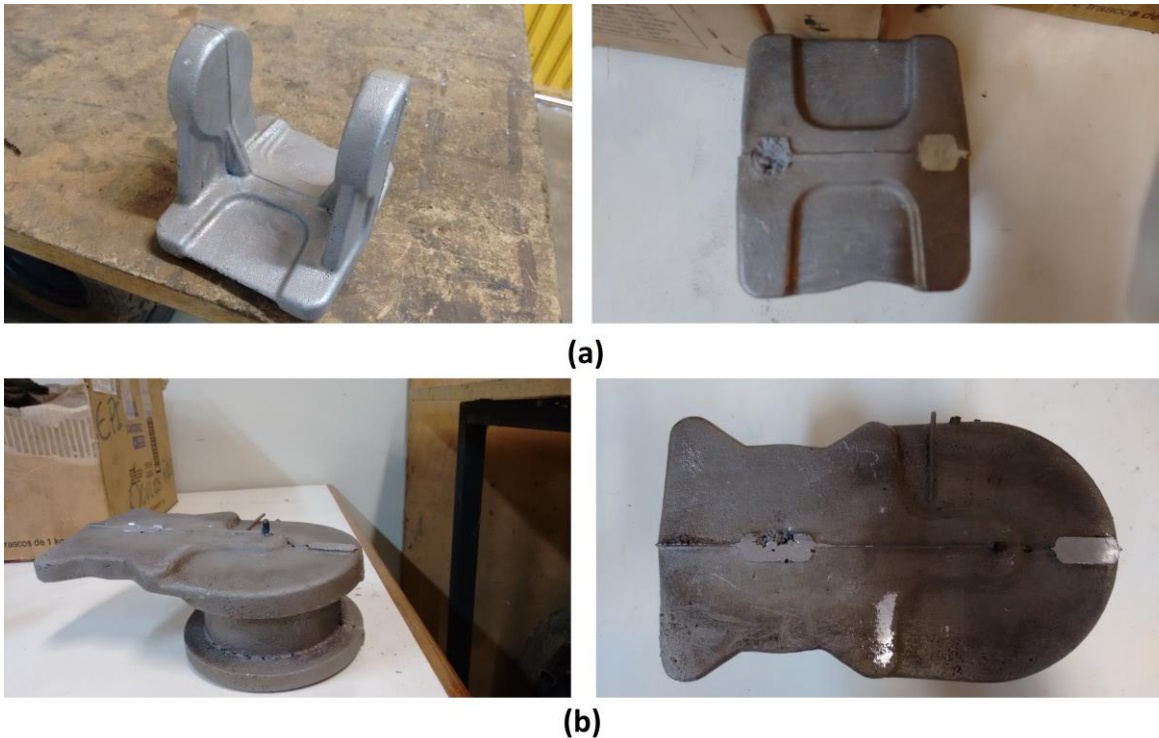


Figura 26 – Fundidos

Fonte: Autor

Com a fundição realizada e os fundidos resfriados foi retirado os canais de alimentação e enchimento. Os fundidos sem acabamento de usinagem estão presentes na Figura 26.

As dimensões dos fundidos sem acabamento estão de acordo com a faixa dimensional esperada, foi identificado uma leve diferença de alinhamento para a peça mancal e sinais de rechupe no canal de alimentação, como ilustra a Figura 26a. Porém estes defeitos não comprometem a utilização do componente.

A peça Base fundida esta ilustrada na Figura 26b. Nota-se que para esta peça, o fundido também apresentou rechupe na área de entrada do canal de enchimento.

Esta falha em ambas as peças, acredita-se que se deve pela relação entre áreas que utilizou área de seção de ataque similar à de distribuição. Então a seção de distribuição pode ter solidificado anteriormente à seção de ataque, não fornecendo material para a suprir a demanda.

Para a peça Mancal, a seção entre os furos A e B, G e F, foi reduzida com o propósito de melhorar a solidificação e o rendimento metálico do fundido, porém sua seção poderia ser mais espessa, visto que o material entre essas seções será removido do fundido no processo de acabamento.

5. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi a produção das ferramentas de fundição necessárias para a fabricação de componentes mecânicos. Estes que fazem parte de um conjunto mecânico, o motor *stirling* tipo *gamma*, que está sendo desenvolvido por meio de uma linha de pesquisa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Desta maneira a forma geométrica dos componentes foi sendo alterada, de modo que a peça não tenha defeitos e fique dentro dos padrões estabelecidos no projeto conceito das mesmas.

A remodelagem dos mesmos precisou ser feita com base em critérios dimensionais estabelecidos no projeto das peças conceito, os critérios dimensionais foram atendidos.

O arranjo geométrico adotado para o formato dos componentes apresentou bons resultados no que diz respeito à moldagem da caixa de fundição e retirada sem danificação do molde.

Os processos de fabricação escolhidos para os modelos possibilitaram a reprodução do formato geométrico com precisão dimensional, porém o bloco usinado apresentou baixa qualidade de acabamento.

Devido ao empenamento da placa não é recomendado a utilização de eucalipto como material para a fabricação de modelos.

A produção do modelo bipartido da peça Mancal foi realizado pelo método de prototipagem rápida, por meio de uma impressora 3D. Este método permitiu a reprodução idêntica ao formato remodelado da peça e garantiu precisão dimensional das mesmas.

Os defeitos de solidificação identificados também estavam presentes na simulação, o que confere uma boa aproximação do simulador com o que acontece na realidade.

Desta maneira os objetivos propostos por este trabalho foram alcançados, permitindo a produção e reprodução dos componentes mecânicos por meio de fundição, utilizando as ferramentas desenvolvidas.

A conclusão esperada de um trabalho que envolva fundição, normalmente é a avaliação da peça após o processo de fundição. Desta maneira os componentes após a fundição não apresentaram defeitos que coloque em risco sua usabilidade.

REFERÊNCIAS

American Foundrymen's Society. **Patternmaker's Manual**, American Foundrymen's Society, Schaumburg Illinois, 1986.

ARAÚJO, Rafaela Moraes. **Metodologia de projeto de produto e seleção de material aplicado ao sistema de direção do veículo Sparta VE UFRJ**. - Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2013.

ASHBY, M. F. **Material Selection in Mechanical Design**. 3a ed., Oxford: Elsevier; 2005.

BEELEY, P. **Foundry Technology**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

CALLISTER, Jr., WILLIAM D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**; Tradução Sergio Murilo Stamile Soares. 7.ed - Rio de Janeiro: LTC, 2012

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. v. 1-3. 2. ed. - São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

GOODWAY, M. **History of Casting**, in: ASM. Metals Handbook, v.15 - Casting. Metals Park: ASM International, 1988.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 6a ed., Upper Saddle River: Person Prentice-Hall, 2010. 1176p.

MELO, Silvio Eduardo Gomes de. **Planejamento de Processos de Fabricação e Montagem Integrada à Programação da Produção em Estaleiros de Construção Naval** / Silvio Eduardo Gomes de Melo – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

PASSINI, A. **Estudo de caso para o cálculo dos sistemas de alimentação e enchimento em moldes de fundição**. Florianópolis, UFSC, Curso de Graduação em Engenharia de Materiais, 2005.

PIWONKA T. S. **Classification of Processes and Flow Chart of Foundry Operations**, in: ASM. Metals Handbook, v.15 - Casting. Metals Park: ASM International, 1988.

PLUTSHACK L. A.; SUSCHIL A. L. **Riser Design**, in: ASM. Metals Handbook, v.15 - Casting. Metals Park: ASM International, 1988.

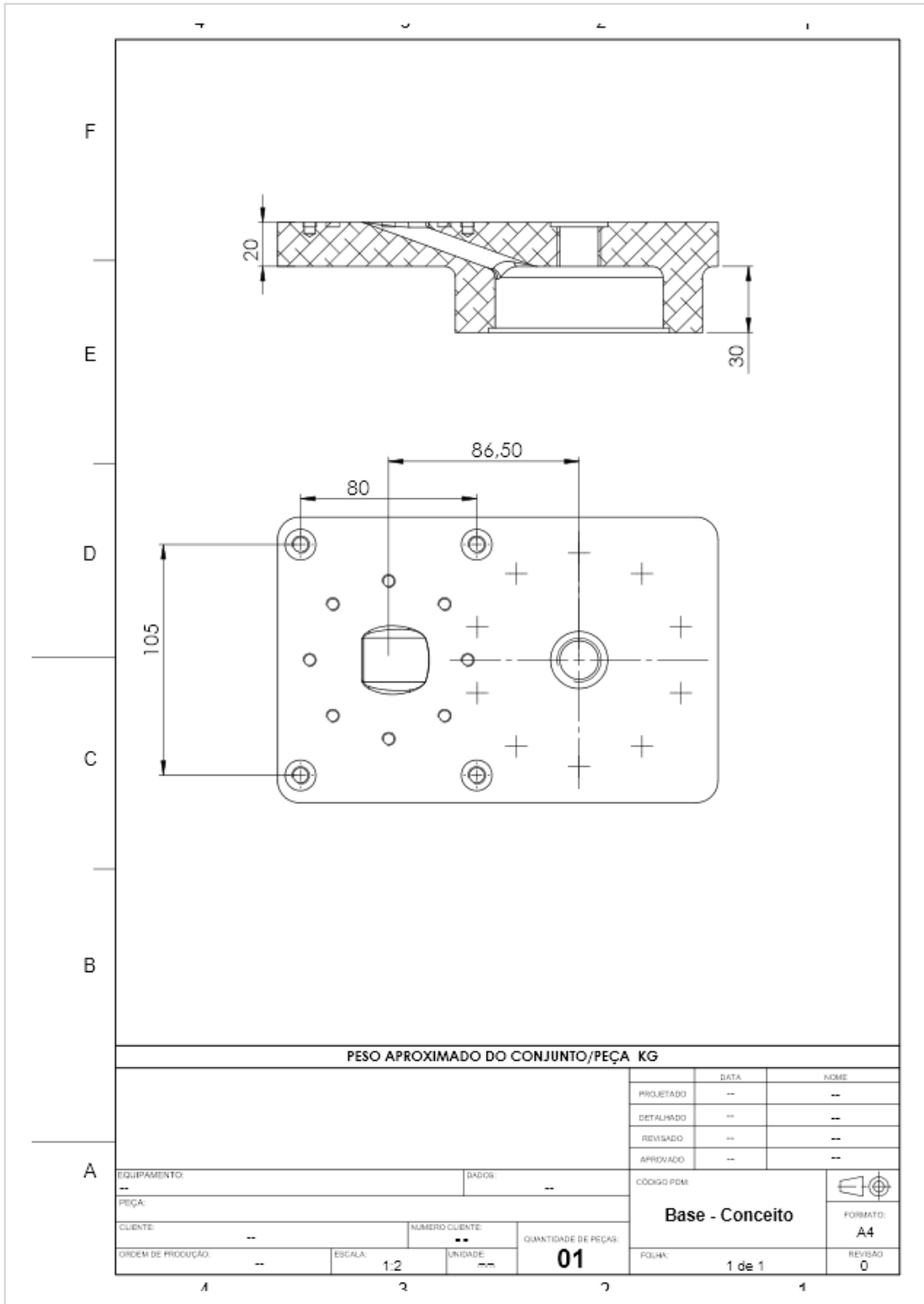
SOARES, G. de A. **Fundição: Mercado, Processo e Metalurgia**, Editora: UFRJ, 2000.

SETTI, D. **Método Multicriterial para Seleção de Processos de Fundição de Metais**, Porto Alegre - 2010

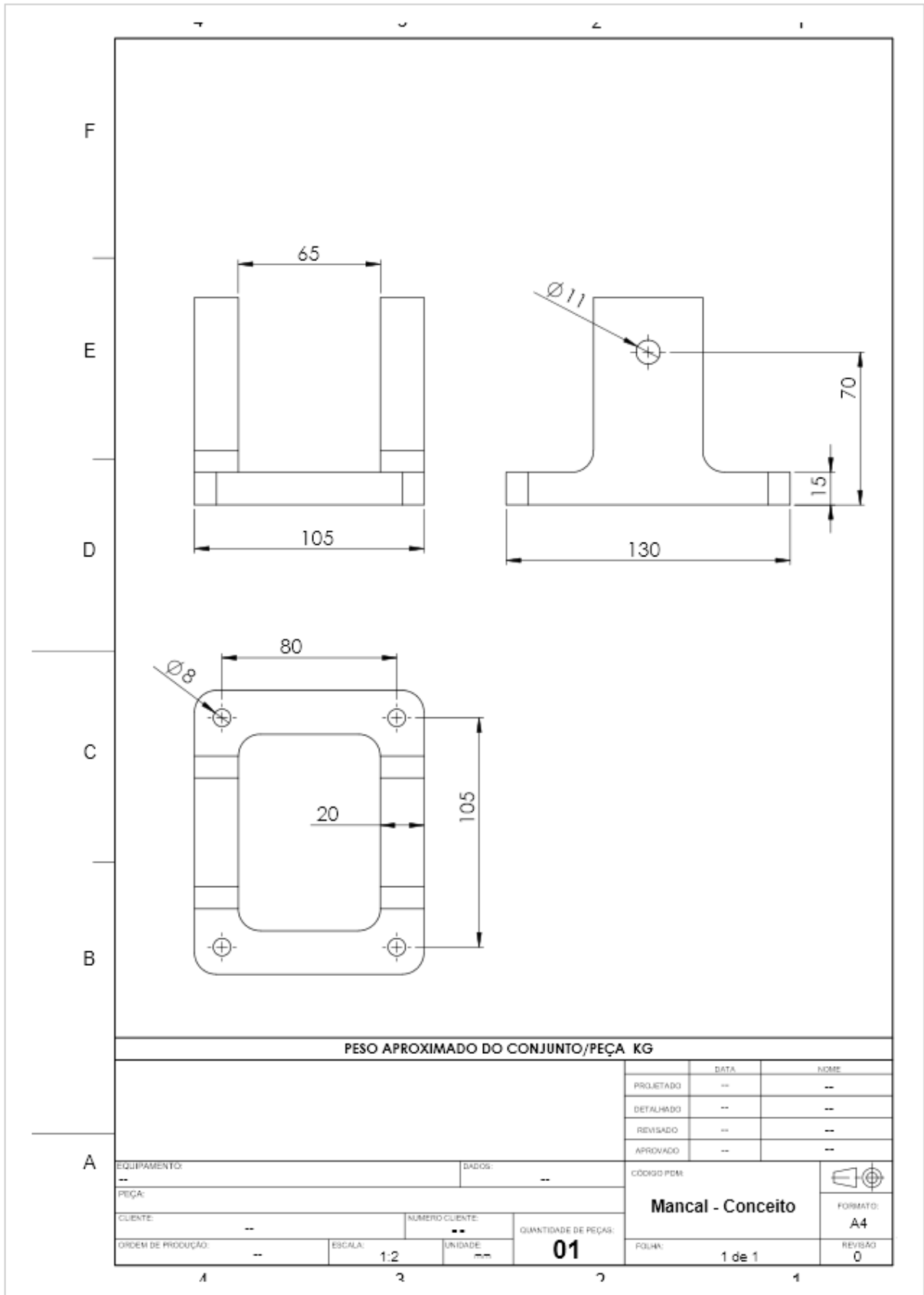
VOIGT, R. C. **Patterns and Patternmaking**, in: ASM. Metals Handbook, v.15 - Casting. Metals Park: ASM International, 1988.

APÊNDICE

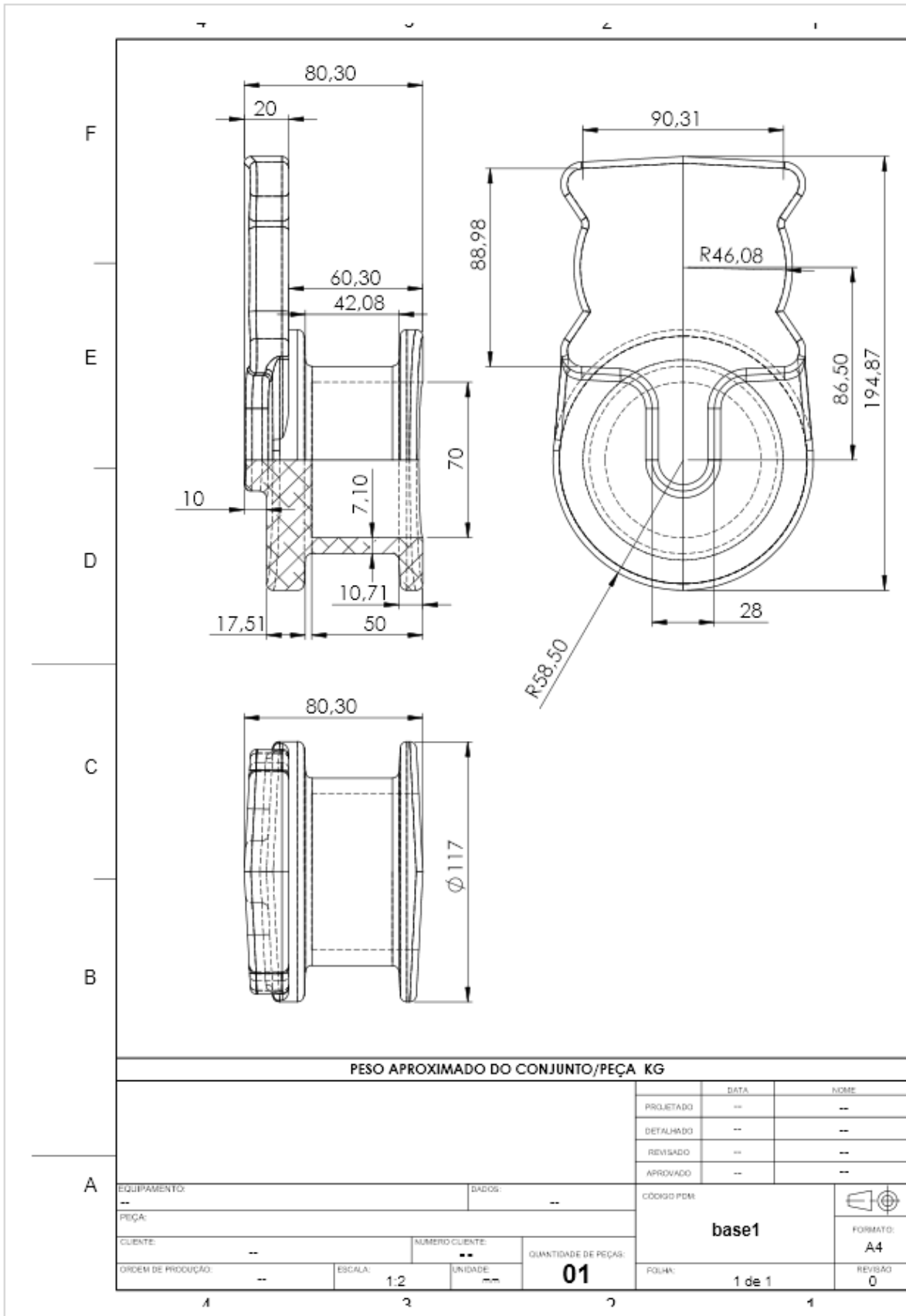
APÊNDICE I - PRINCIPAIS MEDIDAS DO CONCEITO DA PEÇA BASE



APÊNDICE II - PRINCIPAIS MEDIDAS DO CONCEITO DA PEÇA MANCAL



APÊNDICE III - PRINCIPAIS MEDIDAS DA BASE REMODELADA



APÊNDICE IV - PRINCIPAIS MEDIDAS DO MANCAL REMODELADO

