

MANOEL PEREIRA DE SOUZA FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE SEMICUBOS DE RODA AERONÁUTICOS:
UMA CONTRIBUIÇÃO METALÚRGICA EM LIGA
ULTRA-LEVE MAGNÉSIO AZ-91C
À FORÇA AÉREA BRASILEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual Paulista – Campus de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica (Área de Concentração: Materiais).

Orientador: Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães

Co-Orientador: Prof. Dr. Francisco Cristóvão Lourenço de Melo

GUARATINGUETÁ

2006

Souza Filho, Manoel Pereira de

Desenvolvimento de Semicubos de Roda Aeronáuticos: Uma Contribuição Metalúrgica em Liga Ultra-Leve Magnésio AZ-91C à Força Aérea Brasileira / Manoel Pereira de Souza Filho – Guaratinguetá: [s. n.], 2006.

214f. : il.

Bibliografia: f.194-200

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, 2006.

Orientador: Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães
Prof. Dr. Francisco C. L. de Melo

UNESP  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Campus de Guaratinguetá

**DESENVOLVIMENTO DE SEMICUBOS DE RODA AERONÁUTICOS:
UMA CONTRIBUIÇÃO METALÚRGICA EM LIGA ULTRA-LEVE MAGNÉSIO
AZ-91C À FORÇA AÉREA BRASILEIRA**

MANOEL PEREIRA DE SOUZA FILHO

ESTA DISSERTAÇÃO DE TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE

“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO

Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIMARÃES
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. FRANCISCO CRISTÓVÃO LOURENÇO DE MELO
Co-Orientador / CTA/IAE

Prof. Dr. CARLOS KIYAN
UNESP - FEG

Profa. Dra. MIRIAN LOURDES NORONHA MOTTA MELO
USF – PPG-ECM

Março de 2006

DADOS CURRICULARES

MANOEL PEREIRA DE SOUZA FILHO

NASCIMENTO 19/11/1952 – Araióses – MA

FILIAÇÃO Manoel Pereira de Souza
Hilda da Silva Souza

Cursos de Graduação:

1971/1978 Engenharia Metalúrgica – Universidade Federal Fluminense

1998/1982 Engenharia Civil – Universidade do Vale do Paraíba

Cursos de Pós-Graduação

1986 Engenharia de Segurança do Trabalho - Fundacentro/MTE

2004/2006 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de
Mestrado na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá
da UNESP

Dedicatória

de modo especial, aos meus filhos *André e Carolina*, que sempre me encheram de luz, esperança e determinação, e a minha esposa, *Odiná*, pelas lições de generosidade, paciência e dedicação, que me ensina pela vida.

AGRADECIMENTOS

Todo aquele que se propõe a realizar uma obra como um curso de mestrado, compreende o valor da solidariedade, pois descobre no dia-a-dia, nos menores detalhes de um gesto amigo o sentido da generosidade do universo. Nesse momento, o sentimento de gratidão e retribuição se perpetua em vida, assinalando que são tantas pessoas, tantos atos de bondade, tantas atitudes de grandeza e desprendimento que o agradecimento assume dimensões que não se pode alcançar. Assim, na impossibilidade de um agradecimento pessoal a todos aqueles a quem gostaria, manifesto minha infinita gratidão, referindo-me a alguns, com o profundo respeito na intenção de fazê-lo a todos.

INSTITUCIONAIS

A Universidade Estadual Paulista, especialmente a Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá, que distintamente através do corpo docente da Pós Graduação dedicou a atenção e apoio para documentar e registrar essa obra.

A Divisão de Materiais de Instituto de Aeronáutica e Espaço do Centro Técnico Aeroespacial, que me proporcionou todo o conhecimento técnico e infraestrutura necessária para o desenvolvimento desse trabalho de pesquisa, e ao Comando da Aeronáutica que condicionou o suporte econômico para aquisição de material e equipamento para pesquisa e desenvolvimento deste projeto.

PESSOAS

- Ao meu orientador, *Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães*, por sua dedicada orientação, pelo conhecimento e atenção dispensada em todas as ocasiões solicitadas, pela compreensão, apoio e amizade, tão fundamentais para elaboração e conclusão deste trabalho;

- Ao meu co-orientador, *Prof. Dr. Francisco Cristóvão Lourenço de Melo*, pelo constante estímulo e orientação, pelo apoio e amizade, que seguramente contribuiu para que esse trabalho fosse realizado de forma ordenada e objetiva;

- Ao meu amigo pessoal, *Prof. Fortunato Rezende Guimarães*, pela disponibilidade, interesse, detalhismo e infindável paciência, que em todos os momentos desse trabalho, conciliou seu precioso tempo dedicando o máximo da sua energia para que os objetivos se concretizassem. A esse amigo fraternal, o meu respeito, admiração e eterno reconhecimento pela grandeza de espírito e generosidade que a vida lhe concedeu;

- Ao meu amigo pessoal, *Dr. Nelson Magalhães Karan*, pelo incentivo, amizade, compreensão e sábios conselhos, nos quais tenho pautado a minha vida pessoal e profissional;

- Ao *Prof. João Jorge Souza dos Santos*, que me encheu de estímulo e determinação, incentivando-me sempre com palavras de coragem e confiança na lavratura e conclusão deste trabalho. Amigo de fé, lhe dedico a mais profunda gratidão e apreço;

- Ao *Prof. Moacyr Machado Cardoso Junior*, dedicado mestre; um presente de lealdade, amizade e companheirismo que a vida me concedeu. O incentivo, estímulo e confiança, que em mim depositou em todos os momentos desse trabalho, serviram para que refletisse - “*que nada vale a pena se alma é pequena*”;

- Ao *Prof. Dr. Carlos de Moura Neto*, que com seu conhecimento metalúrgico, incentivo e orientação, muito me ajudou na execução e conclusão deste trabalho.

- Aos *Técnicos, Nelson Garcia Cáprio, Irineu de Souza*, da Divisão de Materiais do Centro Técnico Aeroespacial, a minha profunda gratidão pelo apoio, dedicação e companheirismo ao longo de toda a jornada, sem os quais seria impossível o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

“ Em certas ocasiões nossa própria luz quase se apaga e é reacendida pela faísca de alguma outra pessoa. Cada um de nós tem motivo para pensar com muita gratidão nos que acenderam a chama dentro de nós”.

Albert Schweitzer

SOUZA FILHO, M. P. **Desenvolvimento de Semicubos de Roda Aeronáuticos: Uma Contribuição Metalúrgica em Liga Ultra-Leve Magnésio AZ-91C à Força Aérea Brasileira.** 2006. 214f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento das técnicas fundição de semicubos do trem de pouso principal do cargueiro C-115 “Buffalo”, da Força Aérea Brasileira, pelo processo de fundição de liga de magnésio em moldes de areia a verde para atender às necessidades emergenciais nas atividades de apoio logístico, tático e transporte.

Por ser um item estrutural cujas exigências em relação às propriedades de engenharia e segurança são rigorosas, foi necessário o desenvolvimento de técnicas de fundição diferenciadas para a obtenção do modelo com suas respectivas superespessuras de contração e usinagem; ângulos de saída; sistemas especiais de canais de alimentação; molde preparado com areia sintética, bentonita, enxofre, ácido bórico e água; magnésio, alumínio, zinco e alumínio-manganês de grau metalúrgico para a obtenção da liga; tratamento e refino do banho metálico, técnica de vazamento com frentes de alimentação simétricas; controle de qualidade por meio de inspeção visual, análise da composição química e metalográfica das fases e constituintes da liga, ensaios mecânicos e radiográficos para qualificação do fundido, conforme padrões aeronáuticos.

Os ensaios apresentaram resultados cujos valores obtidos foram comparados com os padrões aeronáuticos internacionais, permitindo viabilizar a transferência desse desenvolvimento para o processo produtivo de forma a atender necessidades emergenciais e estimular a evolução do setor aeronáutico do País.

PALAVRAS-CHAVE: semicubos da roda aeronáutica, C-115 “Buffalo”, moldes de areia a verde, areia sintética, bentonita, banho metálico, análise metalográfica.

SOUZA FILHO, M. P. Development of Aeronautical Wheel Semicubes: A Metallurgic Contribution in Ultra-Ligth Magnesium AZ-91C Alloy to Brazilian Air Force. 2006. 212f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

ABSTRACT

This work had as objective the development of the techniques of semicubes casting of the main landing gear of the C-115 "Buffalo" freighter, from Brazilian Air Force, by the process of magnesium alloy casting in green sand molds to attend to the emergent necessities in the activities of logistic, tactical support and air service. The creation of the Project of Nationalization of Aeronautical Components was necessary for the maintenance of the operationalization of the aircraft and to prevent the collapse of the fleet.

Aeronautical wells are a structural item whose requirements in relation to the security and engineering properties are rigorous, it was necessary the development of differentiated techniques of casting for the attainment of the model with its respective superthicknesses contraction and machining; pattern draft; special gate systems; mold prepared in synthetic sand, bentonite sand, sulphur, acid boric and water; magnesium, aluminum, zinc and aluminum-manganese of metallurgical degree for obtention of the alloy; treatment and refining of the metallic bath, pouring technique with symmetrical fronts of feeding; quality control by means of visual inspection, analysis of the chemical and metallographic composition of the phases and mechanical and radiografic constituent of the alloy, assays for qualification of the casting, as aeronautical standards.

The assays had presented resulted whose gotten values had been compared with international aeronautical standards, allowing to make possible the transference of this development for the productive process to pay attention to emergency necessities and to stimulate the evolution of the aeronautical sector of the Country.

KEYWORDS: aeronautical wheel semicubes, C-115 "Buffalo", green sand molds, synthetic, bentonite sand, metallic bath, metallographic analysis.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO.....	30
1.1	IMPORTÂNCIA DO DESENVOLVIMENTO.....	30
1.2	OBJETIVO DO DESENVOLVIMENTO.....	30
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
2.1	O MAGNÉSIO.....	33
2.1.1	Histórico do magnésio.....	33
2.1.2	Características gerais.....	37
2.1.3	Aplicações estruturais e não estruturais do magnésio.....	40
2.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE O MAGNÉSIO E SUAS LIGAS.....	42
2.3	CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE MAGNÉSIO FUNDIDAS.....	48
2.3.1	Considerações gerais.....	48
2.3.1.1	Ligas do sistema Magnésio-Alumínio.....	49
2.3.1.1.1	Liga AZ91C – liga de Magnésio-Alumínio-Zinco.....	52
2.3.1.1.2	AZ91C - Influência dos elementos de liga.....	59
2.3.1.1.3	Efeito dos elementos residuais presentes.....	62
2.3.1.2	Ligas do sistema Magnésio-Zinco-Zircônio.....	63
2.3.1.3	Ligas do sistema Magnésio contendo metais de Terras Raras.....	64
2.3.1.4	Ligas do sistema Magnésio-Tório.....	64
2.4	PROCESSOS DE FUNDIÇÃO APLICADOS ÀS LIGAS DE MAGNÉSIO.....	65
2.4.1	Processos mais usados na fundição das ligas de magnésio.....	65
2.4.1.1	Fundição em areia.....	66

2.4.1.2	Moldes permanentes por gravidade.....	67
2.4.1.3	Fundição sob pressão.....	68
2.4.2	Moldagem em areia verde e sua aplicabilidade nas ligas de magnésio.....	69
2.4.3	Particularidades específicas das areias, aglomerantes e inibidores usados na moldagem das ligas de magnésio.....	70
2.4.4	Características e propriedades determinantes das areias na moldagem das ligas de magnésio.....	77
2.4.4.1	Permeabilidade.....	79
2.4.4.2	Deformação.....	79
2.4.4.3	Resistência à Compressão.....	79
2.4.4.4	Umidade.....	80
2.4.5	Características dos modelos empregados na moldagem em areia de fundição das ligas de magnésio.....	82
2.4.5.1	Considerações gerais.....	82
2.4.5.2	Materiais empregados na modelagem.....	85
2.5	SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DOS MOLDES EM AREIA NA FUNDIÇÃO DO MAGNÉSIO E SUAS LIGAS.....	88
2.5.1	Considerações gerais.....	88
2.5.2	Sistemas de canais de alimentação, alimentadores e resfriadores empregados na moldagem.....	89
2.5.2.1	Sistema de canais de alimentação.....	89
2.5.2.2	Alimentadores.....	92
2.5.2.2.1	Alimentador de menor massa.....	93
2.5.2.2.2	Espaçamento dos alimentadores.....	93
2.5.2.2.3	Junção do alimentador.....	93
2.5.2.2.4	Fluxo padrão no enchimento de moldes.....	94
2.5.2.2.5	Resfriadores.....	95

2.6	TECNOLOGIA DE FUSÃO APLICADA ÀS LIGAS A BASE DE MAGNÉSIO.....	97
2.6.1	Equipamentos e acessórios usados na operação de fundição.....	97
2.6.1.1	Fornos e outros equipamentos de fundição.....	97
2.6.1.2	Fornos.....	97
2.6.1.3	Cadinho.....	98
2.6.1.4	Paneles de vazamento.....	99
2.6.1.5	Paneles para transferência e conchas para remoção de escória.....	99
2.6.1.6	Medidores de temperaturas (Pirômetros).....	100
2.6.1.7	Fluxos.....	101
2.6.2	Técnica de fusão e refino.....	101
2.6.2.1	Fusão.....	101
2.6.2.2	Limpeza do metal fundido.....	102
2.6.2.3	Refino de grão.....	102
2.6.2.4	Carregamento das paneles.....	104
2.7	OPERAÇÃO DE VAZAMENTO.....	105
2.7.1	Métodos e técnicas de vazamento.....	105
2.8	DESMOLDAGEM E LIMPEZA DE FUNDIDOS DE MAGNÉSIO.....	107
2.8.1	Procedimentos gerais.....	107
2.9	INSPEÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE DE FUNDIDOS EM LIGAS DE MAGNÉSIO.....	108
2.9.1	Inspeção de rotina dos fundidos.....	108
2.9.1.1	Inspeção visual primária.....	108
2.9.1.2	Deteccção de trincas.....	109
2.9.1.3	Ensaio radiográficos.....	109
2.9.1.4	Exame de contaminação por fluxo.....	110
2.9.2	Origem e a correção dos defeitos observados.....	110
2.9.2.1	Defeitos visíveis de superfície.....	111

2.9.2.1.1	Reação do molde.....	111
2.9.2.1.2	Trincas.....	112
2.9.2.1.3	Superfícies de manchas azuis.....	112
2.9.2.1.4	Pontos de corrosão.....	113
2.9.2.2	Defeitos indicados na radiografia.....	113
2.9.2.2.1	Óxidos.....	114
2.9.2.2.2	Variações de densidade radiográfica.....	115
2.9.2.2.3	Microporosidades.....	115
2.9.2.2.4	Reação do grão de areia.....	116
2.9.3	Controle de qualidade do fundido.....	116
2.9.3.1	Composição química.....	116
2.9.3.2	Testes mecânicos.....	116
2.10	CONSIDERAÇÕES DE CARÁTER METALÚRGICO DO FUNDIDO..	118
2.10.1	Qualidade requerida nos fundidos.....	118
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	120
3.1	INTRODUÇÃO.....	120
3.2	MÉTODOS.....	121
3.3	FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO APLICADO NO DESENVOLVIMENTO DE SEMICUBOS AERONÁUTICOS.....	122
3.1.1	Detalhamento das principais etapas do processo de fundição.....	123
3.3.1.1	Preparação da areia.....	123
3.3.1.1	Materiais empregados na preparação da areia de moldagem.....	123
3.3.1.2	Classificação e pesagem da matéria prima.....	124
3.3.1.3	Mistura e homogeneização dos ligantes e inibidores.....	124
3.3.1.4	Dosagem dos umidificadores e elaboração da mistura.....	125
3.3.1.5	Controle de qualidade da areia de moldagem.....	125
3.3.1.5.1	Determinação da granulometria da areia.....	127
3.3.1.5.2	Determinação dos valores de resistência à compressão.....	127

3.3.1.1.5.3 Determinação da permeabilidade.....	127
3.3.1.1.6 Qualificação das condições de moldabilidade da areia.....	128
3.3.1.2 Moldagem.....	128
3.3.1.2.1 Materiais empregados na moldagem.....	129
3.3.1.2.2 Materiais empregados na confecção do modelo e do sistema de alimentação da peça.....	129
3.3.1.2.3 Modelo.....	129
3.3.1.2.4 Preparação do modelo e moldagem do macho interno.....	136
3.3.1.2.5 Posicionamento dos resfriadores.....	136
3.3.1.2.6 Assentamento do modelo sobre a caixa base.....	137
3.3.1.2.7 Posicionamento dos canais de alimentação.....	137
3.3.1.2.8 Preenchimento e compactação da areia de moldagem sobre o modelo	138
3.3.1.2.9 Posicionamento dos alimentadores.....	139
3.3.1.2.10 Abertura da caixa e retirada do modelo, canais de alimentação e massalotes.....	140
3.3.1.2.11 Aquecimento dos resfriadores.....	140
3.3.1.2.12 Fechamento das caixas e assentamento das bacias de vazamento.....	141
3.3.1.3 Cálculo da carga metálica.....	142
3.3.1.3.1 Especificação da composição nominal da liga.....	143
3.3.1.3.2 Elaboração da composição de referência para o cálculo de carga da liga AZ91C.....	143
3.3.1.3.3 Especificação dos componentes da carga.....	143
3.3.1.3.4 Cálculo estequiométrico da carga metálica.....	144
3.3.1.3.5 Elaboração da tabela com os pesos calculados e ajustes.....	144
3.3.1.3.6 Quantificação dos pesos praticados na fusão da liga.....	145
3.3.1.4 Fusão da liga (4).....	146
3.3.1.4.1 Materiais empregados na fusão da liga.....	147

3.3.1.4.2	Materiais empregados na proteção, desgaseificação e refino do banho metálico.....	147
3.3.1.4.3	Materiais empregados no vazamento da peça.....	147
3.3.1.4.4	Equipamentos e ferramentas empregados no processo de fusão.....	147
3.3.1.4.5	Seleção da matéria prima (Liga).....	150
3.3.1.4.6	Especificação dos elementos de liga.....	151
3.3.1.4.7	Classificação, separação e pesagem.....	151
3.3.1.4.8	Limpeza da matéria prima.....	151
3.3.1.4.9	Adição de fluxo de cobertura.....	151
3.3.1.4.10	Carregamento da carga metálica.....	152
3.3.1.4.11	Adição de magnésio.....	152
3.3.1.4.12	Adição de alumínio, Alumínio-Manganês e Zinco.....	152
3.3.1.4.13	Preparação para operação de refino.....	152
3.3.1.4.14	Adição de fluxo de refino com agitação do banho (Stirring).....	152
3.3.1.4.15	Remoção de óxidos insolúveis e lamas.....	153
3.3.1.4.16	Descanso do banho metálico.....	153
3.3.1.4.17	Reaquecimento do banho metálico.....	153
3.3.1.4.18	Desgaseificação e refino de grão.....	153
3.3.1.4.19	Retirada de impurezas não metálicas e limpeza do banho.....	154
3.3.1.4.20	Descanso do banho metálico.....	154
3.3.1.4.21	Aquecimento final do banho metálico.....	154
3.3.1.4.22	Preparação para o vazamento.....	155
3.3.1.5	Detalhamento do controle de qualidade.....	157
3.3.1.5.1	Materiais empregados na obtenção de corpos de prova para análises químicas e ensaios mecânicos.....	158
3.3.1.5.2	Materiais empregados na desmoldagem do bruto de fusão.....	158
3.3.1.5.3	Materiais empregados nas análises e ensaios radiográficos.....	158

3.3.1.5.4	Inspeção visual.....	158
3.3.1.5.5	Ensaio químico.....	159
3.3.1.5.6	Ensaio metalográfico.....	160
3.3.1.5.7	Ensaaios mecânicos.....	161
3.3.1.5.8	Ensaaios radiográficos.....	163
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	164
4.1	AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA AREIA DE MOLDAGEM EMPREGADA NO PROCESSO.....	164
4.2	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO CÁLCULO DE CARGA EMPREGADO NA ELABORAÇÃO DA LIGA AZ91C	170
4.3	AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA.....	172
4.4	AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS.....	173
4.4.1	Levantamento das propriedades mecânicas dos corpos de prova fundidos separados, representativos de cada corrida.....	173
4.5	AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS RADIOGRÁFICOS.....	175
5	CONCLUSÕES.....	191
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	193
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	194
	APÊNDICE A - FICHA TÉCNICA DO BUFFALO C-115.....	201
	APÊNDICE B – PROCEDIMENTO DO ENSAIO RADIOGRÁFICO.....	204
	APÊNDICE C – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA BASE DE MOLDAGEM - MÉTODO DE ENSAIO IPT M-34.	214

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aeronave C115 – “Buffalo”.....	31
Figura 2 - Distribuição do Magnésio em aplicações Metalúrgicas (%).....	36
Figura 3 - Tendências e direções atuais de desenvolvimentos de ligas de magnésio.	37
Figura 4 - Pesos dos metais comuns em relação ao aço.....	38
Figura 5 - Utilização do Magnésio.....	41
Figura 6 - Célula unitária do magnésio.....	43
Figura 7 - Diagrama de Equilíbrio Mg-Al.....	49
Figura 8 - Faixas de ligas Mg-Al-Zn potencialmente fundíveis.....	51
Figura 9 - Nomenclatura de uma liga de magnésio adotada pela “The Magnesium Association”.....	53
Figura 10 - Diagrama de Equilíbrio Mg-Mn.....	61
Figura 11 - Diagrama de Equilíbrio Mg-Zn.....	63
Figura 12 - Areia com grãos sub-angulares e angulares.....	71
Figura 13 – Efeito do grau de umidade sobre a resistência à compressão e permeabilidade de uma areia de moldagem.....	80
Figura 14 - Curvas de densidade solta x teor de umidade para misturas contendo quantidades variáveis de um mesmo tipo de argila.....	82
Figura 15 – Curvas de densidade solta x teor de umidade para misturas contendo quantidades teores iguais de diversos tipos de argila.....	82
Figura 16 - Sistema de canais de alimentação.....	90
Figura 17 - Canal de descida.....	91
Figura 18 - Junção inadequada do sistema alimentador-peça.....	94
Figura 19 - Junção adequada do sistema alimentador-peça.....	94
Figura 20 - Uso de tela tubular para controle de enchimento do molde.....	95

Figura 21 - Forno a óleo, estacionário, para fusão de ligas de magnésio em cadinho aberto.....	98
Figura 22 - Cadinhos de aço para magnésio.....	99
Figura 23 - Detalhes de construção de painéis usadas no vazamento de ligas de magnésio.....	99
Figura 24 - Painéis e conchas manuais para transferência de magnésio fundido.....	100
Figura 25 - Medidor digital de temperatura do banho metálico.....	101
Figura 26 - Equipamento usado no refino de grão do magnésio.....	103
Figura 27 - Aparência estriada de corrosão em liga do Magnésio devido à microporosidade causada por contaminação de fluxo.....	110
Figura 28 - Microporosidade do Tipo teia de aranha na Liga AZ91C.....	111
Figura 29 - Trinca a quente em fundição sob pressão.....	112
Figura 30 – Partícula hexagonal de Mg ₂ Si.....	112
Figura 31 - Corrosão devido a contaminação do fluxo com cloreto sobre a superfície do magnésio.....	113
Figura 32 - Cristais primários de manganês em ligas fundidas de magnésio livre de alumínio.....	114
Figura 33 - Óxidos pesados associados a vazios (pontos escuros).....	114
Figura 34 - Microporosidade de contração. Liga AZ92A-T6, fundida em areia verde.....	115
Figura 35 – Aspectos da reação de inclusão de areia.....	116
Figura 36 - Corpo de prova para ensaios de tensão em ligas de magnésio.....	117
Figura 37 a - Aeronave C-115 “Buffalo”.....	120
Figura 37 b - Vista frontal do conjunto de semicubos de roda do trem principal da aeronave.....	120
Figura 37 c - Cubo de roda em perspectiva.....	120
Figura 37 d - Vista lateral conjunto de semicubos de roda do trem principal da aeronave.....	120

Figura 38 - Fluxograma do Processo Aplicado.....	122
Figura 39 - Detalhamento do Processo de Preparação da Areia.....	123
Figura 40 - Misturador utilizado na preparação da areia de moldagem.....	124
Figura 41 - Equipamentos utilizados no controle de qualidade das areias de moldagem.....	126
Figura 42 – Detalhamento do Processo de Moldagem.....	128
Figura 43 – Modelo solto com chavetas (macho).....	131
Figura 44 - Modelo solto do semicubo sem chaveta (fêmea).....	132
Figura 45 – Perspectiva do Sistema de Alimentação não Pressurizado.....	133
Figura 46 – Dimensionamento do sistema de canais de distribuição e ataque.....	133
Figura 47 – Canais de ataque (tipo lápis).....	134
Figura 48 – Reguladores de pressão.....	134
Figura 49 - Alimentadores posicionados na região dos furos de fixação.....	134
Figura 50 – Perspectiva do posicionamento dos alimentadores e resfriadores.....	135
Figura 51 - Resfriador da região das chavetas.....	135
Figura 52 - Resfriador da região da fixação.....	135
Figura 53 - Resfriador da região do flange.....	136
Figura 54 - Moldagem do Macho Interno e colocação do resfriador na caixa base...	137
Figura 55 – Assentamento do modelo com macho sobre a caixa base.....	137
Figura 56 – Preparação para colocação dos canais.....	138
Figura 57 - Posicionamento dos canais de alimentação.....	138
Figura 58 - Preenchimento e Compactação da Areia de Moldagem.....	138
Figura 59 – Finalização da caixa intermediária.....	139
Figura 60 - Assentamento da terceira caixa.....	139
Figura 61 – Retirada dos alimentadores e canais.....	139
Figura 62a – Retirada de excessos de areia.....	140
Figura 62b – Abertura da caixa para retirada do modelo.....	140
Figura 62c – Reparos e acabamentos do molde.....	140

Figura 63 – Aquecimento dos resfriadores.....	141
Figura 64 – Preparação das bacias de vazamento.....	141
Figura 65 – Corte da bacia de vazamento.....	141
Figura 66 – Detalhamento do Processo de Cálculo de Carga.....	142
Figura 67 – Detalhamento do Processo de Fusão.....	146
Figura 68 – Forno a óleo combustível com cadinho removível.....	148
Figura 69 – Ferramentas 5panelas, escumadeiras, conchas, sinos) usadas na fusão do Magnésio.....	149
Figura 70 – Mostra da técnica de vazamento do semicubo através de duas frentes de vazamento.....	155
Figura 71 – Técnica de vazamento do semicubo através de duas frentes.....	156
Figura 72 – Detalhamento do Controle de Qualidade.....	157
Figura 73 – Espectrofotômetro de Absorção Atômica.....	159
Figura 74 – Microscópio Óptico Leica Modelo DMRXP.....	160
Figura 75 - Máquina Universal, marca INSTRON, modelo 1332.....	161
Figura 76 – Garra da Instron com Corpo de Prova para Ensaio Mecânico.....	162
Figura 77a – Moldagem dos corpos de prova em moldes de areia.....	162
Figura 77b - Corpos de prova fundidos.....	162
Figura 78 – Aparelho de Raios-X, marca Andrex, modelo CMA20.....	163
Figura 79 - Gráfico dos resultados dos ensaios de resistência à compressão obtido com a Composição X, com tempo de mistura de 9 minutos.....	166
Figura 80 - Gráfico dos resultados dos ensaios de Permeabilidade obtido com a Composição X, com tempo de mistura de 9 minutos.....	167
Figura 81 - Gráfico dos resultados dos ensaios de resistência à compressão obtido com a Composição Y, com tempo de mistura de 12 minutos.....	168
Figura 82 - Gráfico dos resultados dos ensaios de Permeabilidade obtido com a Composição Y, com tempo de mistura de 12 minutos.....	169

Figura 83 - Gráfico comparativo dos resultados dos ensaios de Resistência à Compressão obtidos para as misturas X e Y.....	169
Figura 84 - Gráfico comparativo dos resultados dos ensaios de Permeabilidade obtidos para as misturas X e Y.....	169
Figura 85 - Aspecto da microestrutura da liga AZ91C-F fundida em areia apresentando a fase massiva [α (Mg) + β (Mg - Al)] rodeada pelo precipitado lamelar $Mg_{17}Al_{12}$. Ataque: acético- glicol – 15s.....	173
Figura 86 - Gráfico de Resultado das Corridas 1A a 5B - Semicubos com Chavetas.....	178
Figura 87 - Gráfico de Resultado das Corridas 6A a 10B- Semicubos com Chavetas.....	179
Figura 88 - Perspectiva do sistema de alimentação do semicubo com alimentador inteiro, circular, posicionado na região dos furos de fixação e resfriador sob a região do flange.....	181
Figura 89 - Gráfico de Resultado das Corridas 11A a 15B - Semicubos com Chavetas.....	182
Figura 90 - Gráfico de Resultado das Corridas 16A a 23B - Semicubos com Chavetas.....	183
Figura 91 - Gráfico de Resultado do Índice de Aprovação de Semicubos com Chavetas – Corridas 1A a 23B.....	184
Figura 92 - Gráfico de Resultado das Corridas 24A a 29A - Semicubos sem Chavetas.....	187
Figura 93 - Gráfico de Resultado das Corridas 29B a 34B - Semicubos sem Chavetas.....	188
Figura 94 - Gráfico de Aprovação das Corridas 24A a 34B de Semicubos sem chavetas.....	189

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produção de magnésio antes do fim da 2 ^a Guerra Mundial.....	34
Tabela 2: Produção de magnésio após a 2 ^a Guerra Mundial.....	34
Tabela 3 – Energia necessária para a fusão de alguns metais.....	38
Tabela 4 - Volumes específicos do Magnésio em função da temperatura.....	43
Tabela 5 - Solubilidade dos Gases com a Temperatura.....	47
Tabela 6 - Composição Nominal das Ligas de Magnésio para Fundição.....	52
Tabela 7 - Código Internacional para designação das Ligas de Magnésio.....	53
Tabela 8 - Composição Limite da liga AZ91C.....	55
Tabela 9 - Propriedades Mecânicas a temperatura ambiente da liga AZ 91C.....	55
Tabela 10 - Propriedades Mecânicas e Propriedades Físicas Gerais da Liga AZ91C	56
Tabela 11 - Temperatura de Fundição.....	57
Tabela 12 - Características Gerais da liga AZ91C.....	57
Tabela 13 - Especificações Técnicas Internacionais da Liga de Magnésio AZ-91C..	58
Tabela 13A - Especificação Americana da Liga AZ-91C em Moldes de Areia.....	58
Tabela 13B - Especificação Inglesa e Especificação Russa.....	58
Tabela 13C - Especificação Alemã e Especificação Francesa.....	59
Tabela 14 - Inibidores mais comuns agrupados por classe.....	74
Tabela 15 - Mistura típica Inglesa	76
Tabela 16 - Mistura típica Americana.....	77
Tabela 17 - Mistura Francesa Aplicada na Moldagem de Rodas de Avião.....	77
Tabela 18 - Contração, Espessura Mínima da Seção e a Tolerância Mínima de Usinagem e Acabamento de Fundidos em Areia de vários Metais Estruturais.....	84
Tabela 19 - Espessura mínima de seção, mm.....	85
Tabela 20 - Dimensões dos Corpos de Prova.....	117
Tabela 21 – Composição Nominal da Liga AZ91C.....	143

Tabela 22 – Composição de Referência para o cálculo de carga.....	143
Tabela 23 – Especificação da Composição dos Componentes da Carga.....	144
Tabela 24 - Folha de Carga Final.....	145
Tabela 25 - Composição apresentada no trabalho de Lo Ré, 1963.....	164
Tabela 26 - Composições experimentais elaboradas para estudo da aplicabilidade no processo de moldagem.....	165
Tabela 27 – Resultados obtidos com a Composição X.....	166
Tabela 28 - Resultados obtidos com a Composição Y.....	168
Tabela 29 - Composição final após análise química.....	171
Tabela 30 – Valores médios de composição e desvio da composição nominal.....	172
Tabela 31 - Propriedades mecânicas da liga AZ91C – ASTM B80-90.....	175
Tabela 32 – Propriedades Mecânicas dos corpos de prova fundidos.....	173
Tabela 33 - Resultados dos ensaios radiográficos de rodas com chavetas – Corridas 1A a 5B.....	177
Tabela 34 - Resultados dos ensaios radiográficos de rodas com chavetas – Corridas 6A a 10B.....	179
Tabela 35 - Resultados dos ensaios radiográficos de rodas com chavetas – Corridas 11A a 15B.....	181
Tabela 36 - Resultados dos ensaios radiográficos de rodas com chavetas – Corridas 16A a 23B.....	183
Tabela 37 - Índices de reprovação por região de inspeção radiográfica dos semicubos com chavetas.....	184
Tabela 38 – Índices de reprovação dos semicubos com chaveta identificados pelos lotes - 1A a 5B, 6A a 10B, 11A a 15B, 16A a 20B, 21A a 23B e pelos lotes de 1A a 10B e 11A a 23B.	184
Tabela 39 - Resultados dos ensaios radiográficos de semicubos sem chavetas das corridas 24A a 29A.....	186
Tabela 40 - Resultados dos ensaios radiográficos de semicubos sem chavetas.....	188
Tabela 41 – Índices gerais de reprovação do semicubo sem chavetas.....	189
Tabela 42 – Índices de aprovação do semicubo sem chavetas por lote de 11 corridas.....	190

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIFA	- Associação Brasileira de Fundição
ABM	- Associação Brasileira de Metais
AECMA	Association Europeene des Construteurs de Materiel
AFA	- American Foundrymen's Association
AFNOR	Association Française de Normalisation
AFS	- American Foundrymen's Society
AMR	- Divisão de Materiais
ASM	- American Society for Metal
ASTM	- American Society for Testing Materials
C-115	- Buffalo, cargueiro militar utilizado pela Força Aérea Brasileira
CAB	- Comissão Aeronáutica Brasileira
CNTP	- Condições Normais de Temperatura e Pressão
CTA	- Centro Técnico Aeroespacial
DIN	- Deutsch Industrie Für Normen
D.T.D	- Defense Trade Designation
FAB	- Força Aérea Brasileira
GPM	- Grupo de Processos Metalúrgicos
IACS	- International Annealed Copper Standard
IAE	- Instituto de Atividades Espaciais
IPD	- Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Mg-Al	- Magnésio-Alumínio
Mg-Al-Mn	- Magnésio-Alumínio-Manganês
Mg-Al-Zn	- Magnésio-Alumínio-Zinco
Mg-Ca-RE	- Magnésio-Cálcio-Terras Raras
Mg-Li-X	- Magnésio-Lítio-Outros
Mg-RE-Zr	- Magnésio- Terras Raras
Mg-Si	- Magnésio-Silício
Mg-Th-Zr	- Magnésio-Tório-Zircônio
Mg-Zn-Ag-Zr	- Magnésio-Zinco-Prata-Zircônio
Mg-Zn-Zr	- Magnésio-Zinco-Zircônio
SAE	- Society of Automotive Engineers
T	- Tonelada
UNS	- Unified Numbering System

LISTA DE SÍMBOLOS

'	- minuto
”	- polegada
A	- areia
α_a	- coeficiente de expansão linear perpendicular ao eixo hexagonal
AA-356	- liga de alumínio-silício-magnésio
α_c	- coeficiente de expansão linear paralelo ao eixo hexagonal
α, β	fases metálicas
Ag	- prata
Al	- alumínio
AlF ₃	- fluoreto de alumínio
BCl ₃	- tricloreto de boro
BF ₃	- trifluoreto de boro
C	- carbono
C ₂ Cl ₆	- hexacloretano
Ca	- cálcio
CaC ₂	- carbeto de cálcio
CaCl ₂	- cloreto de cálcio
CaF ₂	- fluoreto de cálcio
cal	- caloria
CCl ₄	- tetracloreto de carbono
cm	- centímetro
c_p	- calor específico à pressão constante
C_p	- capacidade calorífica
Cr	- cromo
Cu	- cobre
Etanol 2,2 oxybis	- dietileno glicol

F	- como fabricado
Fe	- ferro
g	- grama
GPa	- giga Pascal
H	- hidrogênio
H10, H11	- levemente envelhecido por deformação a frio
H ₂ O	- água
H23	- encruado e parcialmente recozido
H24	- encruado e parcialmente recozido
H26	- encruado e parcialmente recozido
H ₃ BO ₃	- ácido bórico
HB	- dureza Brinnell
HRE	- dureza Rockwell E
in	- polegada
K	- Kelvin
KBF ₄	- fluorborato de potássio
KCl	- cloreto de potasio
kg	- quilograma
kJ	- quilojoule
Lo	- comprimento da seção reduzida do CP
L	- comprimento final após a ruptura
Li	- lítio
Liq.	- líquido
MF	- módulo de finura
Mg	- magnésio
Mg ₂ Si	- composto intermetálico
Mg ₄ Al ₃	- composto intermetálico
MgCl ₂	- cloreto de magnésio

MgO	- óxido de magnésio
mm	- milímetro
μm	- micrometro
Mn	- manganês
MP	- coquilha
MPa	- megapascal
N	- Newton
Na	- Sódio
NaBF_4	- fluorborato de sódio
NaCl	- cloreto de sódio
NH_4BF_4	- borofluoreto de amônio
$\text{NH}_4\text{F.HF}$	- Fluoreto de amônio
$(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$	- fluorsilicato de amônio
Ni	- Níquel
O	- recozido
O	oxigênio
°	- Grau
\emptyset	- diâmetro
°C	- graus Celsius
°F	- grau Fahrenheit
Fr	- carga de ruptura
σ_t	- limite de resistência à tração
σ_e	- carga de escoamento
$\sigma_{0.2}$	- limite de escoamento
$\epsilon \%$	alongamento percentual
Pol	- polegada
RE	- terras raras

S	- área da seção crítica
S	- enxofre
s	- segundo
Σ	- somatório
Sc	- escândio
Si	- silício
Sn	- estanho
SO ₂	- dióxido de enxofre
Sol.	- sólido
T	- temperatura
t	- tonelada
T4	- solubilizado
T5, T51	- envelhecido artificialmente (sem solubilização intencional)
T6, T61	- solubilizado e envelhecido artificialmente
T8	- solubilizado, trabalhado e envelhecido artificialmente
Th	- Tório
Ti	- Titânio
V	- Volt
Ω	- resistência elétrica - Ohm
w	- Watt
Zn	- Zinco
Zr	- zircônio

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO DESENVOLVIMENTO

Com o pensamento voltado para pesquisa e desenvolvimento de processos e inovações tecnológicas o Centro Técnico Aeroespacial é uma instituição de referência no desenvolvimento da tecnologia aeroespacial brasileira, cujo reconhecimento é consolidado em realizações, como: *criação da Embraer, motor a álcool (automotivo e aeronáutico), veículos lançadores de satélites, centros de lançamento de foguetes, tecnologia de satélites e inúmeras pesquisas de ponta com materiais avançados reconhecidos pela comunidade científica mundial.*

Consciente da responsabilidade que desempenha no desenvolvimento do programa aeroespacial brasileiro e das necessidades estruturais e emergenciais da Força Aérea Brasileira, o Centro Técnico Aeroespacial tem mostrado sua participação efetiva ante os desafios de interesse nacional.

Projetos de pesquisa como o “Projeto Nacionalização de Semicubos Aeronáuticos” foram desafios emergenciais decorrentes das dificuldades que a Comissão Aeronáutica Brasileira – CAB, encontrava na aquisição de componentes aeronáuticos - *semicubos da roda do trem de pouso principal e secundário da aeronave C-115 Buffalo*, no país de origem.

Por ser um item estrutural crítico, o *semicubo* trabalha sob condições severas de impacto, carga e resistência, sendo rigorosamente submetido, por exigência das normas internacionais de segurança, a uma criteriosa inspeção visual a cada pouso e decolagem. Obedece a um cronograma de rigorosas inspeções pré-programadas para avaliar e controlar a vida útil de desempenho e substituição de acordo com os padrões militares internacionais estabelecidos para as operações de pouso e decolagem.

A solução estratégica urgente era desenvolver a nacionalização desse componente e evitar um possível colapso da frota em exercício permanente em todas as missões da

Força Aérea Brasileira. O C-115 Buffalo, mostrado na Figura 1, cargueiro militar é amplamente solicitado e continuamente utilizado em missões de transporte de tropas, busca e salvamento, transporte de componentes e motores-foguetes para os Centros de Lançamento de Alcântara e Barreira do Inferno, transporte logístico e de ressuprimento para as unidades da FAB, do Exército e da Marinha do Brasil.

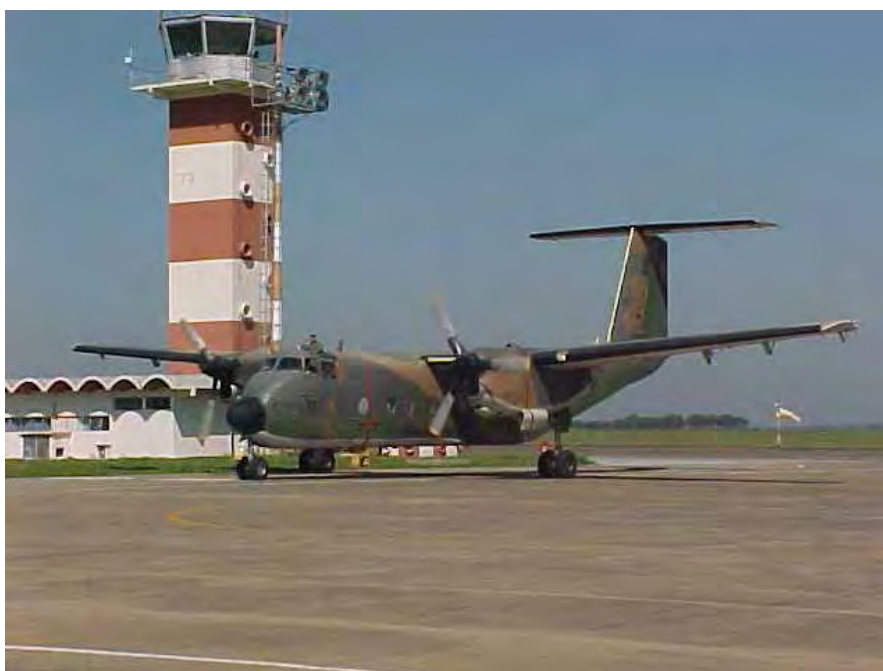


Figura 1 – Aeronave C115 – “Buffalo” ·

1.2 OBJETIVO DO DESENVOLVIMENTO

Inicialmente, foi feito um estudo técnico para definir qual o processo metalúrgico sendo o processo de fundição em liga de magnésio em molde de areia verde considerado o mais econômico e compatível com as exigências do projeto em conformidade com os padrões aeronáuticos.

Considerado um desafio por ser um projeto de pesquisa com uma liga ultra-leve de magnésio, um metal extremamente reativo que exige conhecimento aprofundado das suas características físico-químicas, cuja sensibilidade à oxidação violenta, reação instantânea a umidade, riscos de incêndios e explosão, são fatores significativos no tempo de resposta

para o domínio da tecnologia de desenvolvimento e obtenção de fundidos de qualidade. Assim, foi desenvolvida uma tecnologia especial de fundição, com tempo de maturação necessário para atingir a capacitação tecnológica desejada.

Foi realizado um criterioso trabalho de pesquisa e intensivos experimentos com o objetivo de determinar os materiais e processos aplicados para alcançar maior eficiência. Inicialmente, foi feito um estudo da peça para elaboração do modelo, seguido do estudo da escolha do material do molde, elaboração das técnicas de posicionamentos do sistema de alimentação da peça, desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia de fundição da liga especificada e, por fim, um rígido acompanhamento e controle metalúrgico do fundido dentro dos padrões aeronáuticos internacionais.

Esse desenvolvimento, considerado inédito e diferenciado é tido como pioneiro no país, e foi realizado no Laboratório de Fundição do Grupo de Processos Metalúrgicos (GPM) da Divisão de Materiais (AMR) do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IPD) com a aplicação de procedimentos especiais de fundição específicos para fundidos de padrão aeronáuticos, uma vez que fundidos em liga de magnésio produzidos para o mercado interno não alcançam as exigências de qualidade metalúrgica estabelecidas pelo o referido padrão.

Os resultados obtidos nessa pesquisa foram atingidos e os objetivos do Comando da Aeronáutica plenamente alcançados graças ao planejamento, ordenamento, domínio e manutenção do processo metalúrgico durante toda a etapa do desenvolvimento permitindo que os componentes fossem usados com confiabilidade e vida útil compatível com as exigências das normas internacionais, no menor custo possível. Acrescenta-se que este propósito serviu de incremento para o desenvolvimento da tecnologia de materiais e processos, proporcionando capacitação técnica e independência tecnológica, justificada na transferência de tecnologia para o processo produtivo gerando estímulo a expansão e crescimento da cadeia produtiva. Percebe-se que contribuições técnicas desta natureza são resultados e avanços extremamente significativos para o desenvolvimento da tecnologia no país.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O MAGNÉSIO

2.1.1 Histórico do magnésio

Os compostos de magnésio são conhecidos de longa data, embora o elemento magnésio só tenha sido reconhecido por BLACK, em 1755. Coube a DAVY isolá-lo em 1808 e a BUSSY, prepará-lo de forma coerente, em 1831 (CRC, 2005).

O magnésio é o oitavo elemento mais abundante na crosta terrestre. Ele não ocorre na forma pura, mas é encontrado em grandes depósitos na forma de magnesita, dolomita e outros minerais. Pode ser obtido por eletrólise do cloreto de magnésio fundido derivado da salmoura e também da água do mar (CRC, 2005). Contudo, para se chegar ao metal algumas considerações devem ser feitas em relação aos processos - térmicos e eletrolíticos.

Os processos térmicos oferecem como principais vantagens maior flexibilidade de produção, menor investimento e obtenção de magnésio mais puro. Os eletrolíticos têm a vantagem de serem contínuos, de custos operacionais mais baixos, menor consumo de energia e sem limites para expansão de escala de produção. No mundo, 65% do magnésio produzido é por via eletrolítica e 35% por via térmica. No Brasil, o processo escolhido foi o térmico denominado Ravelli (FRANÇA, 1999).

Após este rápido sumário sobre as possibilidades de obtenção do magnésio, é conveniente fazer-se um ligeiro histórico da industrialização deste metal visando ressaltar a evolução que apresentou e as perspectivas atuais: Antes da 2^a Guerra Mundial, o maior produtor era a Alemanha que, por falta de minério de alumínio, construiu a sua Força Aérea com magnésio proveniente da magnesita austríaca. Em 1937, aquele país produziu 12.080 t num total mundial de 19.600 t, enquanto que a produção norte-americana foi de 2.059 t e a japonesa de 1.200 t. Em 1944 as produções tiveram grande impulso como pode ser verificado na Tabela 1 (GOUVEIA et al., 1959):

Tabela 1: Produção de magnésio antes do fim da 2ª Guerra Mundial

Alemanha	50.000 t
EUA	142.518 t
Japão	17.000 t

O crescimento norte-americano estancou aí, sendo que no ano seguinte a produção foi menor que 30.000 t para, em 1946, cair ainda mais, não chegando a 5.000 t. Isso não representou um retrocesso nas aplicações do metal, mas apenas o aproveitamento, na paz, de uma superprodução durante a guerra, tanto que, pouco depois, as produções foram conforme se verifica na Tabela 2.

Tabela 2: Produção de magnésio após a 2ª Guerra Mundial

1950	14.266 t
1951	36.280 t
1952	95.600 t

O Brasil, embora não sendo produtor, não via, guardada as proporções, o consumo de magnésio crescer. Contudo, informações veiculadas sobre o seu consumo no “Automotive Industry”, março de 1955, davam conta de que a indústria automobilística em 1960 produziria 200.000 veículos e cada unidade possuiria, em média, 1,11 kg deste metal, perfazendo um consumo de mais de 200 t. Existiam ainda outros setores de emprego, tais como: adição de magnésio como elemento de liga no alumínio num total superior a 30.000 toneladas anuais, gerando um consumo de 300 t de magnésio além de aplicações futuras nas indústrias naval e aeronáutica (GOUVEIA et al., 1959).

Com o desenvolvimento industrial, a viabilidade de emprego do metal foi crescendo e se estendendo a outros setores tornando o Brasil um dos mais importantes consumidores mundiais de magnésio após os EUA, ex-URSS, Alemanha e Japão (MAGNESIUM,

2005). O crescimento desse mercado foi gradativo, atingindo-se uma participação de 4,8% em 1975 e, com vistas de chegar a 6% em 1980 (12.000 toneladas) (CÂMARA; SANTOS; MONTENEGRO, 1979).

Embora tendo suplantado essa marca com 13400 t (ABIFA, 1997) essa perspectiva de emprego foi diminuindo a cada ano chegando a 6800 t em 96. Nos anos subseqüentes os valores de referencia de produção de fundidos de magnésio não foram animadores chegando a 5900 t em 2000, e continuaram em queda ano após ano, atingindo a marca de 4900 t no ano de 2004 (ABIFA, 2005).

Essa realidade é fruto de uma economia em constante desequilíbrio que proporciona um mercado instável desestabilizando a evolução produtiva.

Por outro lado, uma análise atual do mercado mundial revela um crescimento de consumo, renovando assim, seu interesse pelo metal. Portanto, a expressiva taxa de consumo atingida em 1998, no total 360.000 t/ano, ao preço de US\$ 3,6/kg, significa uma retomada de crescimento na aplicação do magnésio em todos os setores da cadeia produtiva. Nos próximos dez anos a taxa de crescimento está prevista para 7% ao ano (MORDIKE; EBERT, 2001).

Como as oscilações de mercado geram paralisias significativas na demanda de determinados produtos, a estagnação no consumo de magnésio ocorrido há pouco tempo atrás, se deveu a falta de aplicação em larga escala de ligas de magnésio que, no passado, resultou em limitação das pesquisas e desenvolvimentos. Conseqüentemente, existem poucas ligas fundidas otimizadas disponíveis, e em número menor ainda para ligas trabalhadas. As técnicas de produção foram adaptadas daquelas ligas com ponto de fusão baixo, como por exemplo, o alumínio. Nenhuma experiência está disponível para novas técnicas de trabalho e o conhecimento adquirido se perdeu. Recentemente, a demanda renovada começou a mudar esse quadro. O número de produtores primários tem crescido e é esperado que o consumo aumente ainda mais a preços acessíveis. A Figura 2 mostra a distribuição das aplicações metalúrgicas do magnésio e suas tendências e interesses de mercado (MORDIKE; EBERT, 2001).

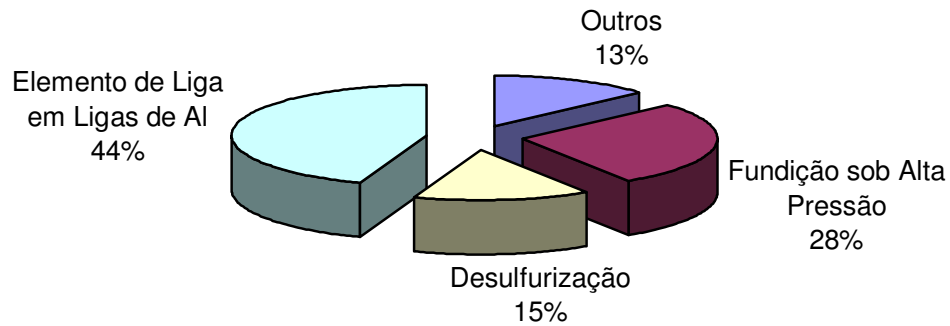


Figura 2. Distribuição do Magnésio em aplicações Metalúrgicas (%).
(MORDIKE; EBERT, 2001).

O perfil das características de demanda da indústria automotiva e outras de uso potencial do magnésio, em grande escala, têm revelado a necessidade do desenvolvimento de ligas. A transferência direta de desenvolvimentos de ligas aeronáuticas de alto desempenho, não é possível, tanto pelo aspecto de custo, como pelo perfil das propriedades que não coincidem, inviabilizando o seu emprego. A Figura 3 mostra o andamento atual das diferentes tendências no desenvolvimento de ligas.

Considerando que a vasta maioria das aplicações do magnésio é coberta pela liga AZ-91 da família Magnésio-Alumínio-Zinco, a Figura 3 mostra os novos desenvolvimentos da família Mg-Al (Magnésio-Alumínio). Para Fundição sob Pressão, Mg-Al-Mn (Magnésio-Alumínio-Manganês; para ligas trabalhadas, Mg-Al-Zn (Magnésio-Alumínio-Zinco) e para Ligas Fundidas em Areia, Mg-Si (Magnésio-Silício) e Mg-Ca-RE (Magnésio-Cálcio-Terras Raras). O desenvolvimento do Mg-Li-X (Magnésio-Lítio-Outros), corresponde a super liga leve, onde a adição de Lítio diminui a resistência mecânica, mas aumenta a ductilidade (MORDIKE; EBERT, 2001)).

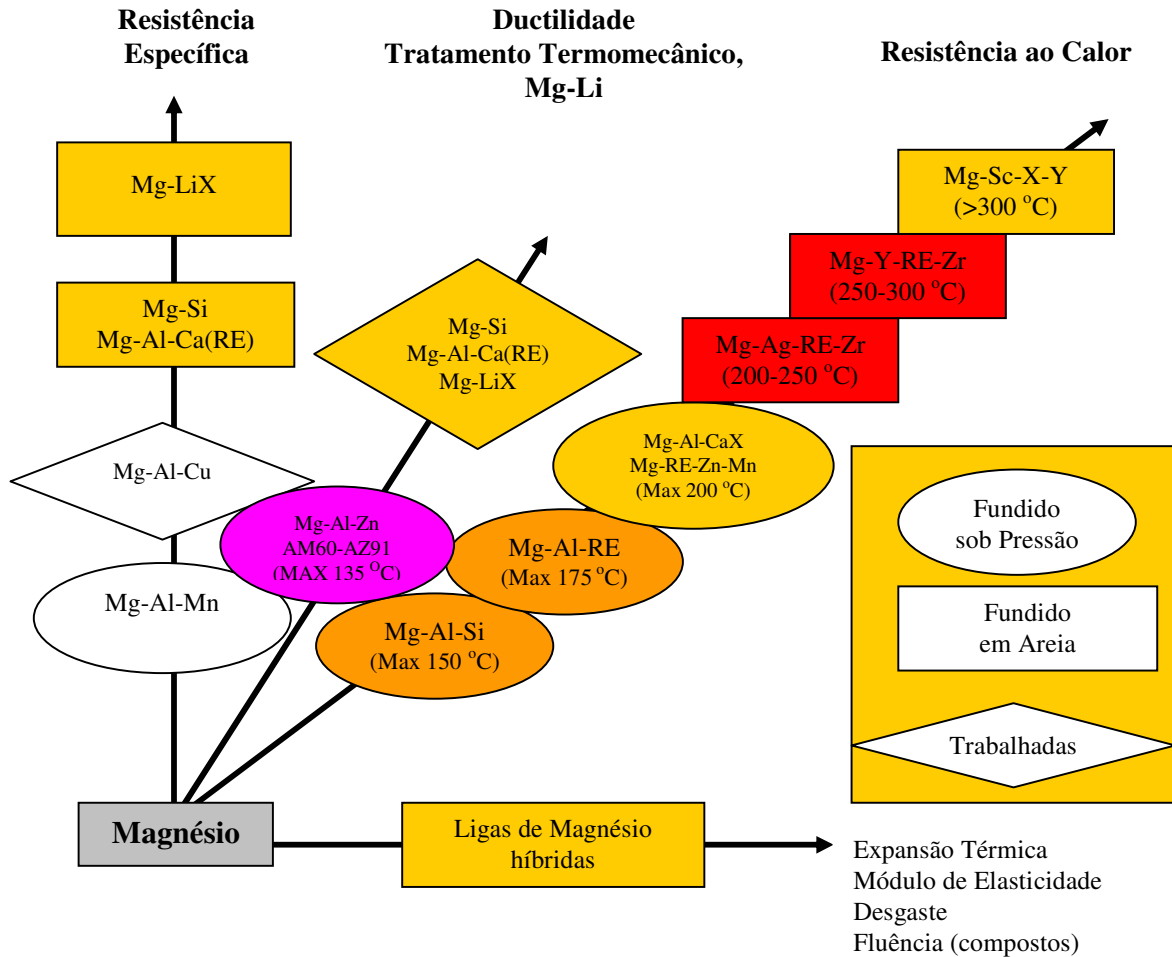


Figura 3 – Tendências e direções atuais de desenvolvimentos de ligas de magnésio (MORDIKE; EBERT, 2001).

2.1.2 Características gerais

O magnésio é o mais leve dos metais estáveis ao ar e, de longe, o mais leve dos metais comumente disponíveis como mostrado na Figura 4 (CATON, 1991). Sua massa específica é 1740 kg/m^3 , somente superior às do cálcio, sódio, potássio e lítio, que são extremamente oxidáveis. É um terço mais leve que o alumínio, 4,5 vezes mais leve que o aço e cinco vezes mais leve que o cobre (GOUVEIA et al., 1959).

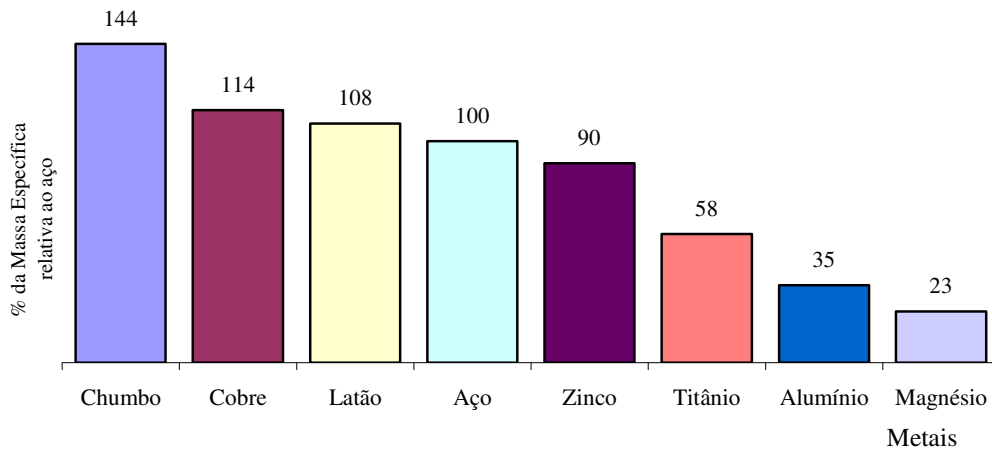


Figura 4 - Pesos de metais comuns em relação ao aço (CATON, 1991).

Possui baixa resistência a tração comparada ao alumínio. Algumas ligas atingem até cerca de 35 kg/mm^2 , enquanto o metal puro apresenta de $3,5$ a $8,75 \text{ kg/mm}^2$. Tomando como referencial o seu peso específico, o magnésio e suas ligas são os que oferecem maior resistência à tração por unidade de peso, quer no estado recozido, quer no trabalhado. O baixo módulo de elasticidade (cerca de 4500 kg/mm^2 contra 7.000 kg/mm^2 para o alumínio e 21.000 kg/mm^2 para o aço) é um fator negativo em muitas aplicações, porém desejável em outras como absorvedor de energia em peças sujeitas a vibrações, impactos e choques. Apresenta elevado calor específico médio, somente ultrapassado pelo berílio, boro e alguns alcalinos. Entretanto, para atingir a fusão, quando comparado com iguais volumes de outros metais, apresenta uma economia de calor como pode ser verificado na Tabela 3 (GOUVEIA et al., 1959):

Tabela 3 – Energia necessária para a fusão de alguns metais.

Magnésio	472 kcal/dm^3
Alumínio	648 kcal/dm^3
Cobre	1540 kcal/dm^3
Ferro	2630 kcal/ dm^3

Como possui elevada condutividade térmica, sendo o 5º entre todos os metais e o 3º excetuando os metais preciosos, fica atrás apenas do cobre e do alumínio. Sua elevada fragilidade a quente é responsável pela sensível perda de resistência, sendo de apenas um terço do seu valor normal quando à temperatura de 200 °C, o que nas fundições é prejudicial, requerendo, para atenuar esse fato, grande colapsibilidade nos machos de areia ou desmoldagem rápida na fundição em moldes metálicos.

Quando em forma de pós ou cavacos, é altamente pirofórico e sua inflamabilidade em ar abundante pode se dar até a pouco mais de 300 °C. Razão pela qual, durante a 2ª Grande Guerra, 40% da produção norte-americana foi usada na fabricação de bombas incendiárias. Entretanto, peças compactas só se inflamam a cerca de 100 °C acima do ponto de fusão, o que permite o seu emprego até em máquinas térmicas. Pode ser fundido em areia, em moldes metálicos e sob pressão, dando peças de notável perfeição e acabamento. Peças de magnésio fundidas sob pressão apresentam um rendimento de produção 20% maior que o de idênticas peças de alumínio.

É perfeitamente soldável por qualquer processo, inclusive por brasagem e por fusão (GOUVEIA et al., 1959). Pode ser extrudado, permitindo obter perfilados dos mais diversos. Embora apresente algumas dificuldades às deformações plásticas a frio, sua deformabilidade a quente é excelente, tanto que alguns formatos feitos num só embutimento em chapas de magnésio necessitariam de dois embutimentos, se fossem de aço ou de alumínio.

Possui uma posição altamente eletropositiva, o que favorece, com a presença de impurezas metálicas, a ação corrosiva da umidade. Por outro lado, permite que seja empregado como anodo auxiliar, ligado eletricamente à massa que se deseja proteger (como exemplo, casco de navios). A massa funciona como catodo e a corrosão atuará no anodo de magnésio (GOUVEIA et al., 1959).

2.1.3 Aplicações estruturais e não estruturais do magnésio

O magnésio tem como principal característica a baixa densidade. Essa propriedade é responsável pelo potencial do metal, principalmente na utilização em meios de transporte (CÂMARA; SANTOS; MONTENEGRO, 1979) e na movimentação de peças que necessitam de baixa inércia, sujeitas a freqüentes e repentinas mudanças de velocidade e direção (CATON, 1991). Nesse campo, onde a economia em peso implica na redução do consumo de combustível, o magnésio se destaca frente aos principais concorrentes, que são os plásticos e o alumínio.

A combinação de baixa densidade, elevada resistência e rigidez e excelente fundibilidade qualifica as ligas de magnésio como materiais ideais para componente de peso reduzido (KLEINER ET AL, 2002). Isso serve para mostrar o vasto potencial do magnésio e suas ligas, que se destaca através do crescente campo de aplicações, justificando, assim, o interesse cada vez maior do mercado mundial.

Antes de considerar mais detalhes da sua utilização é importante citar que o magnésio pode ser classificado em duas categorias principais: ESTRUTURAIIS e NÃO ESTRUTURAIIS (METALS HANDBOOK VOL 2, 1990).

Sob ponto de vista detalhado a Figura 5 possibilita uma visão abrangente das principais aplicações do magnésio.

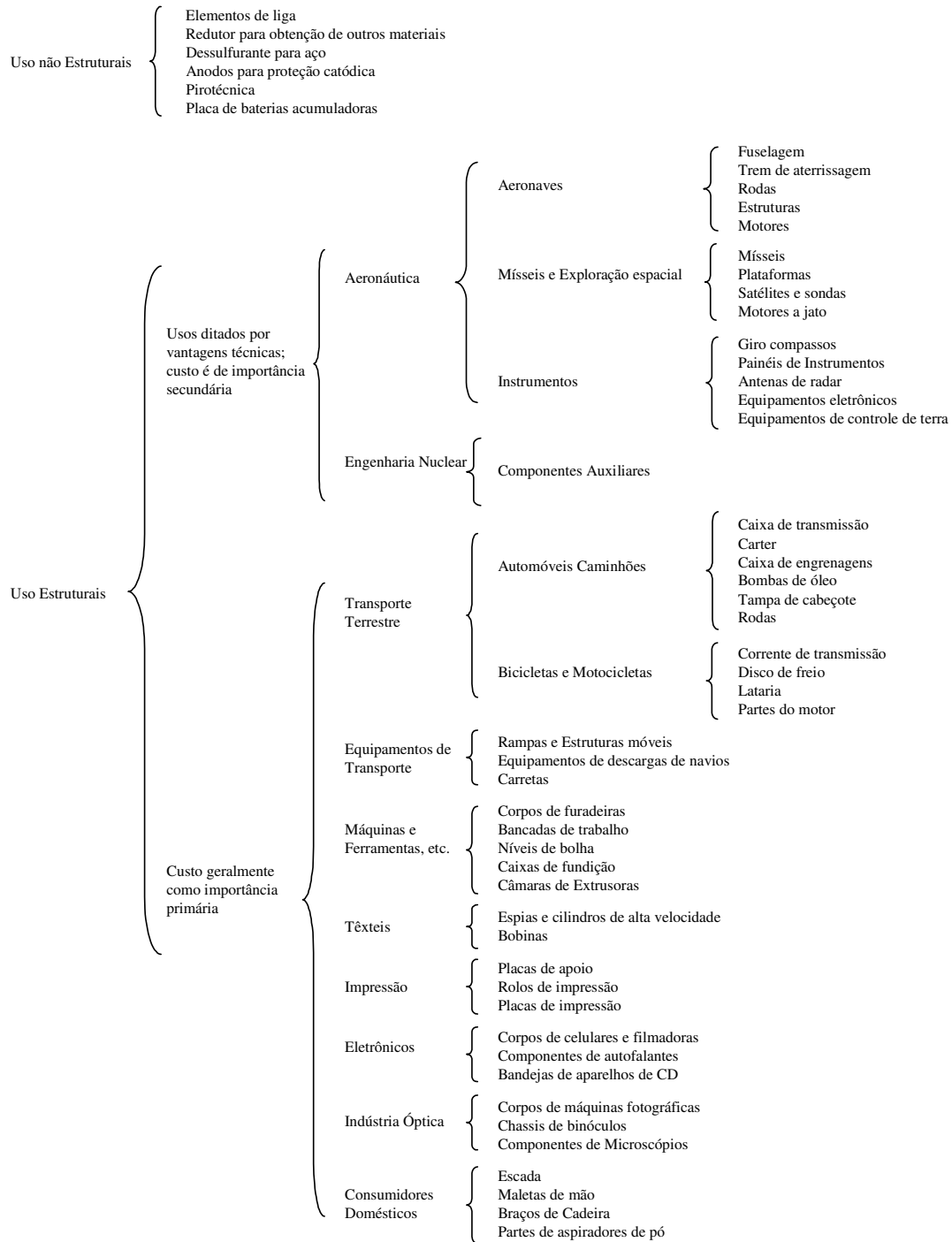


Figura 5 – Utilização do Magnésio.

2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MAGNÉSIO E SUAS LIGAS

O magnésio conhecido como elemento típico ocupa um lugar no Grupo II da Tabela Periódica, e é considerado como o mais leve dos metais bivalentes típicos. O átomo no estado livre tem seu núcleo iônico composto de dois elétrons no nível 1s, dois no nível 2s e seis elétrons em 2p.

Os dois elétrons resultantes no nível 3s são os elétrons de valência e são facilmente removíveis. O magnésio é, portanto, fortemente eletropositivo formando um óxido estável e um hidróxido que é uma base forte. É prontamente atacado por ácidos formando íons Mg^{++} em solução. O potencial eletrolítico normal é -2,38V; isto é uma indicação da sua reatividade química e pode ser comparada com -2,71V para o sódio, -1,67V para o alumínio, +0,344V para o cobre e + 0,799V para a prata (RAYNOR, 1959).

O magnésio cristaliza em uma estrutura hexagonal compacta sob pressão atmosférica (Figura 6). A relação axial, contudo, não corresponde exatamente a um empacotamento compacto de esferas, na qual c/a é igual a 1,6236. A 25 °C as dimensões da célula unitária, são (MAGNESIUM, 2005):

$$a = 0,32092 \text{ nm}, c = 0,52105 \text{ nm e } c/a = 1,6236 \quad (1)$$

O coeficiente de expansão térmica varia com a temperatura, embora de 0° C a 310° C seja aproximadamente linear. Nessa faixa o coeficiente de expansão linear perpendicular ao eixo hexagonal (α_a) é $27,2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, enquanto que o paralelo ao eixo hexagonal (α_c) é $28,1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Com o aumento da temperatura, aumenta a relação axial e a estrutura aproxima-se mais da esfera compacta (RAYNOR, 1959).

A massa específica do magnésio é conhecida precisamente, entretanto, depende da pureza do metal. O valor mais provável é 1.740 kg/m^3 a 20 °C (CIZEK, L., ET AL., 2004). Experimentos macroscópicos e de raios-X oferecem resultados semelhantes, que correspondem a valores de densidade 1.585 kg/m^3 (estado líquido) e 1.650 kg/m^3 (estado sólido).

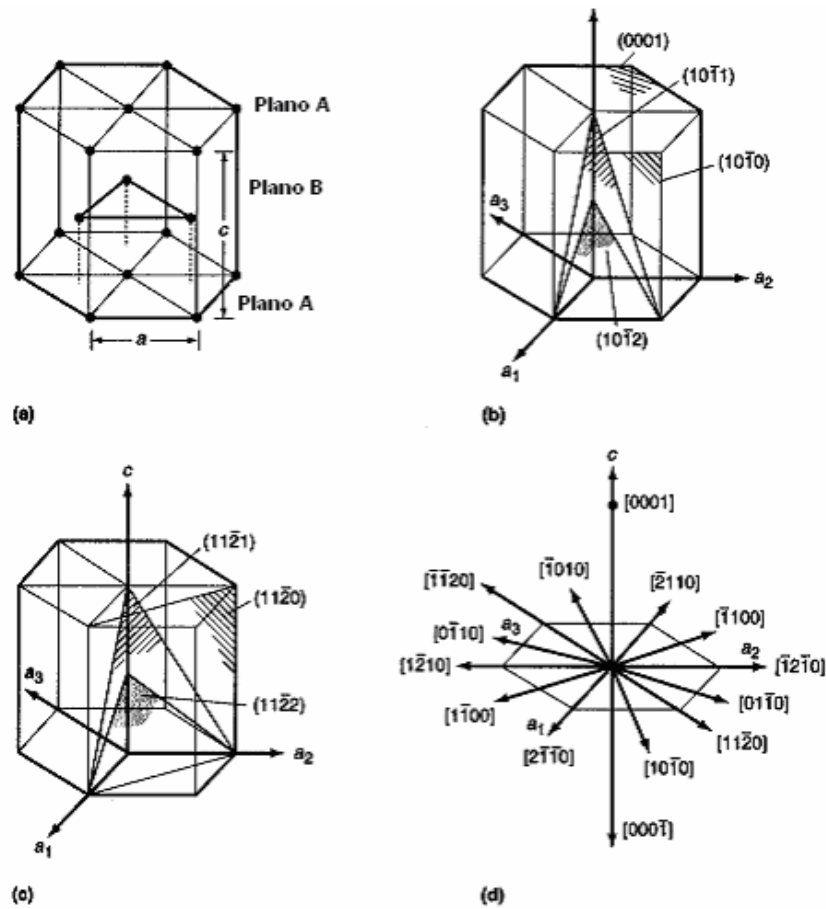


Figura 6 - Célula unitária do magnésio. (a) Posições atômicas. (b) Plano basal, plano da face e os planos principais da zona $[1210]$. (c) Planos principais da zona $[1100]$. (d) Direções principais (AVEDESIAN; BAKER, 1999).

Volumes específicos em outras temperaturas são expressos na Tabela 4 (RAYNOR, 1959).

Tabela 4 - Volumes específicos do Magnésio em função da temperatura

Temperatura °C	Vol. Específico m^3/kg (cm^3/g)	Massa Específica kg/m^3 (g/cm^3)
20	$0,5730 \times 10^{-3}$ (0,5730)	1.745 (1,745)
400	$0,5910 \times 10^{-3}$ (0,5910)	1.692 (1,692)
500	$0,5965 \times 10^{-3}$ (0,5965)	1.676 (1,676)
600	$0,6025 \times 10^{-3}$ (0,6025)	1.622 (1,622)
700	$0,6350 \times 10^{-3}$ (0,6350)	1.575 (1,575)
800	$0,6429 \times 10^{-3}$ (0,6429)	1.555 (1,555)

O Ponto de Fusão é significativamente afetado pelas impurezas, por isso várias temperaturas foram registradas na literatura. O trabalho mais confiável com material puro indica um valor de 650 °C. Para o ponto de ebulição têm sido relatados valores variando de 1086 °C a 1087 °C e alguns graus de preferência entre os valores descritos são permitidos pela variação de pressão de vapor do magnésio líquido com a temperatura (RAYNOR, 1959).

Poppema e Jaeger¹ (1935 apud RAYNOR, 1959), expressaram o calor específico do magnésio em função da temperatura com

$$C_p = 0,241306 + 0,1052836 \times 10^{-3} T - 0,4725 \times 10^{-10} T^2 \quad (2)$$

O calor específico médio do magnésio fundido entre 650 °C e 750 °C, é igual a: 0,266 cal/g °C, encontrado por Awbery e Griffiths² (1925/6 apud RAYNOR, 1959). O calor específico do vapor de magnésio monoatômico é 0,2043, independente da temperatura, e a capacidade térmica pode ser interpolada usando:

$$C_p = a + 2bT - cT^{-2} \quad (3)$$

onde: a = 0,1835;

b = 0,000076; e

c = -1360,5 para o magnésio sólido; e

a = 0,2176;

b = 0,0000535; e

c = 484,63 para o líquido;

T está em K.

Como as propriedades físico-químicas do magnésio dependem do grau de pureza, os valores apresentados podem diferir das outras fontes de pesquisa. Entretanto, convém frisar que os valores apresentados satisfazem os objetivos do trabalho.

O magnésio é encontrado comercialmente com grau de pureza superior a 99,8%, sendo raramente usado para aplicação em engenharia na forma pura. Seu comportamento como formador de ligas é notável para uma variedade de elementos com os quais formará

¹ T. J. Poppema, F. M. Jaeger. Proc. Acad. Sci. Amst. 1935 38 514.

soluções sólidas. O alumínio, zinco, lítio, prata, zircônio e tório são exemplos de metais que aparecem em ligas comerciais com o magnésio.

- As principais características das ligas de magnésio são a baixa massa específica (1740 a 1820 kg/m³ a 20 °C) menor entre as ligas industriais, a excelente relação resistência a tração-peso, a capacidade de amortecimento de vibrações e a resistência à fadiga. As peças apresentam boa estabilidade dimensional em trabalho até 93 °C.

- A toxidez das ligas de magnésio é nula, elas não formam compostos tóxicos quando em contato com substâncias alimentares.

- A condutibilidade térmica entre 20 °C e 260 °C é 154,5 a 152,8 W/m.K (Avedesian; Baker, 1999).

- A condutibilidade elétrica é igual a 38,6% da condutibilidade do cobre (SIMONS, 1967). Considerando condutores de pesos equivalentes, a condutibilidade do magnésio corresponde a 195% da condutibilidade do cobre.

- A usinabilidade do magnésio é considerada como fácil de ser realizada entre os metais. O metal apresenta ainda ótimas propriedades de deformação plástica.

Em decorrência destas características, as ligas de magnésio têm vasta aplicação industrial, principalmente na indústria automobilística e aeroespacial, além de outros empregos em eletrodomésticos, aparelhos ópticos e de projeção cinematográfica.

As peças poderão ser fabricadas pelos processos de fundição (em areia, casca, moldes permanentes e precisão) ou por deformação plástica (BARÃO, 1978).

- A temperatura de fusão das ligas de magnésio varia entre 593 °C a 670 °C. Pode-se citar a liga AZ855 (AZ80A) com intervalo de solidificação entre 470 °C e 600 °C e a liga AM503 (M1A) com intervalo entre 650 °C e 651 °C. Devido a baixa capacidade calorífica, a temperatura de vazamento (super-aquecimento) das ligas está compreendida entre 720 °C e 800 °C.

- O intervalo de solidificação das ligas de magnésio varia com a composição química das ligas. Algumas delas como, por exemplo, Mg-Al-Zn, apresenta um intervalo

² J. H. Awbery, E. Griffiths. Proc. Phys. Soc. Lond. 1925/6 38 395.

de solidificação grande o que dá origem a micro-rechupos dispersos na massa metálica, muito prejudiciais as características mecânicas das peças (BARÃO, 1978).

- O calor específico do magnésio sólido é 1,025 kJ/kg a 20 °C. No estado líquido, 1,32 kJ/kg°C; e calor latente de fusão varia de 360 a 377 kJ/kg. (METALCASTER'S, 1989).

Devido a pequena massa específica das ligas a capacidade calorífica (quantidade de calor por volume) é baixa (entre 0 °C e 100 °C é igual a 0,25cal/g.°C.) (SIMONS, 1967), o que justifica o vazamento em temperaturas elevadas (800 °C).

- A contração de solidificação do magnésio é grande, sendo 4,4% em volume para o magnésio puro. O coeficiente de expansão térmica é 26,1 $\mu\text{m}/\text{m}.\text{°C}$ entre 20 °C e 100 °C (AVEDESIAN; BAKER, 1999) e as ligas entre 26 e 27,3 $\mu\text{m}/\text{m}.\text{K}$ no intervalo de 20 °C a 200 °C.

As ligas de grande intervalo de solidificação apresentam sempre as maiores contrações de solidificação de que o metal base.

- A contração do magnésio sólido e suas ligas é elevada, da ordem, 4,2% em volume a 650 °C de líquido para sólido e 1,8% linear entre 650 °C e 20 °C no estado sólido (METALCASTER'S, 1989). Algumas ligas apresentam alta fragilidade a quente.

- A tensão superficial do magnésio é inferior a do alumínio, $556 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$ (556 dinas/cm) a 700 °C (SIMONS, 1967). Como o peso específico também é baixo e a penetração do metal entre os intervalos dos grãos de areia (poros) varia na razão direta da tensão superficial e inversa da massa específica e do tamanho dos poros, é possível empregar areias com menor módulo de finura, (do que as usadas para alumínio e cobre) a fim de se obter maior permeabilidade.

- A fluidez - depende da temperatura de vazamento. Como a capacidade calorífica das ligas de magnésio é baixa, a fluidez diminui rapidamente, à medida que a temperatura se aproxima do ponto de solidificação.

- A dissolução de gases - o hidrogênio é altamente solúvel no magnésio, tanto no estado sólido, como no estado líquido. A reação de dissolução é endotérmica, tornando-se

mais espontânea à medida que a temperatura aumenta, conforme as relações dadas na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5 - Solubilidade dos Gases com a Temperatura

Temperatura (°C)	650 °C	650 °C	900 °C
Volume de Hidrogênio em cm ³ /100g de Mg, CNTP	(Mg Sol.) 20	(Mg Liq.) 26	30

O hidrogênio produz porosidade intensa nas ligas de magnésio, devido à diferença de solubilidade no estado líquido e sólido. Outros gases, tais como dióxido de carbono, anidrido sulfuroso e nitrogênio têm pequena influência na formação da porosidade.

- A reatividade - o magnésio e suas ligas reagem intensamente, no estado líquido, com o oxigênio do ar, com o vapor d'água, com gases resultantes da combustão e em menores proporções com o nitrogênio. Acima de 800 °C essas ligas entram em combustão rápida, em presença do ar e explodem em contato com a água. Atacam pouco os cadinhos de metais ferrosos, o que permite o seu uso na fusão de um grande número de ligas, com exceção daquelas de alta pureza, resistentes a corrosão.

O magnésio reage com o vapor d'água segundo a reação: $Mg + H_2O \rightarrow MgO + 2H$ (dissolvido no metal líquido). O óxido de magnésio é insolúvel no metal líquido, mas suas partículas sólidas, devido ao pequeno tamanho ficam dispersas na massa, podendo produzir inclusões nas peças após a solidificação (BARÃO, 1978).

Outras considerações de natureza específicas sobre o magnésio se destacam na elevada relação dentre a resistência mecânica e peso, boa usinabilidade e estabilidade dimensional das suas ligas. Embora no passado as ligas de magnésio apresentassem problemas que limitaram seu uso: corrosão e perigo de incêndio, estes foram resolvidos através de aprimoramento da composição de ligas e de técnicas de fundição, que consistem principalmente em controlar a contaminação por ferro e teores residuais de

cobre e níquel, do controle de temperatura e proteção do banho, da cuidadosa segurança e técnicas adequadas na usinagem (FINARDI, 1971).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS LIGAS DE MAGNÉSIO FUNDIDAS

2.3.1 Considerações gerais

As ligas de magnésio para fundição podem ser classificadas em 4 grupos:

O primeiro grupo é baseado no sistema binário Mg-Al e pode ser subdividido em ligas contendo ou não zinco como outro elemento de liga (FINARDI, 1971). A série baseada no sistema de ligas Mg-Al-Zn tem sido usado por muitos anos em aplicações gerais onde a temperatura de trabalho não ultrapassa de 125 °C.

O segundo grupo é baseado no sistema de ligas Mg-Zn-Zr. Estas ligas são também usadas em temperaturas de trabalho abaixo de 125°C, ainda que a adição de metais terras raras ou tório melhore um pouco sua capacidade de resistir a temperaturas mais elevadas. Algumas ligas do sistema apresentam baixa resistência mecânica, boa resistência à corrosão quando usada em ambientes úmidos; e outras, elevada relação resistência-peso, mas não possuem boas características de fundição. Uma extensão desse sistema é a família de ligas Mg-Zn-Ag-Zr que apresentam excelentes propriedades mecânicas (AFS, 1965).

O terceiro grupo de ligas é baseado no sistema Mg-RE-Zr (RE, do inglês, Rare Earths), e são usadas em aplicações para temperaturas de trabalho acima de 290°C. As terras raras são importantes elementos de liga que podem melhorar as características do fundido, propriedades a altas temperaturas e resistência à corrosão, sem afetar a condutividade elétrica da liga base (LÜ Y ET AL., 2000). São ligas que apresentam, em curto tempo, as melhores propriedades de resistência nas temperaturas acima de 260°C, de todas as ligas de magnésio.

O quarto grupo de ligas é baseado no sistema Mg-Th-Zr com ou sem zinco que encontram aplicações em componentes de operação a temperaturas acima de 340°C.

2.3.1.1 Ligas do sistema Magnésio-Alumínio

Um dos elementos que apresenta estas características e que por muitos anos foi o principal constituinte das ligas de magnésio é o alumínio. Em condições de equilíbrio forma com o Magnésio uma solução sólida com 12,65% a 435 °C, e diminui por volta de 2%, à temperatura ambiente (Figura 7). As ligas fundidas mais comuns contêm normalmente 2 a 10% deste elemento junto com uma pequena adição de Zinco e Manganês.

As ligas Mg-Al são relativamente baratas quando comparadas com outras ligas disponíveis de magnésio. Elas são prontamente fundíveis e exibem boas propriedades mecânicas (DAHLE, A. K., ET AL, 2001).

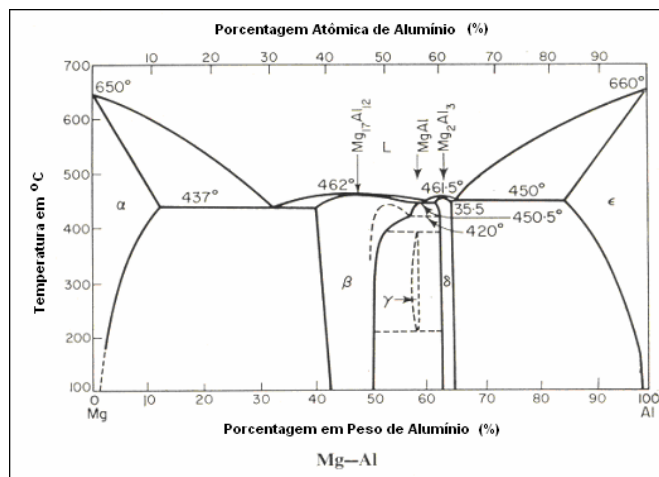


Figura 7 - Diagrama de Equilíbrio Mg-Al (EMLEY, 1966).

As ligas de magnésio-alumínio-zinco são geralmente superiores as ligas magnésio-alumínio em especial o limite de escoamento que é quase sempre o fator de limitação na aplicação de ligas de magnésio. Além disso, as ligas ternárias possuem excelente moldabilidade.

A adição de manganês em todas as ligas de magnésio contendo alumínio visa o aumento da resistência à corrosão (FINARDI, 1971).

Historicamente as ligas binárias de magnésio-alumínio foram as primeiras a serem desenvolvidas e, portanto, têm sido a base dos sistemas mais largamente usados de ligas

fundidas de magnésio. Essas ligas na maioria dos casos foram substituídas pelas ligas de magnésio-alumínio-zinco, de melhores características, produzidas extensivamente na Alemanha entre 1914 e 1918. Elas apresentavam problemas de corrosão em ambientes úmidos ou molhados, que foram reduzidos em 1925, com pequenas adições de manganês no metal fundido, que aumentavam a resistência à corrosão da liga resultante. Assim, pensou-se por muitos anos que o manganês atuava diretamente para melhorar a resistência à corrosão do magnésio, mas agora se reconhece que sua ação é para remover as impurezas nocivas tais como ferro e outras impurezas dos compostos intermetálicos relativamente inofensivas (GREENFIED, 1972).

Hoje em dia, a corrosão não é um problema em liga de magnésio. Como no caso de muitos outros metais em atmosferas industriais, a corrosão do magnésio e suas ligas é inibida por um filme superficial de proteção formado pelo ataque inicial.

Nas primeiras ligas comerciais a ruptura do filme de proteção superficial ocorria de imediato, principalmente devido a presença do ferro, níquel e outros metais catódicos presentes como impurezas. Isso causava corrosão galvânica em micro-escala rompendo o filme protetor e induzindo o ataque rápido.

Por muitos anos, constantes desenvolvimentos no refino e nas técnicas de fusão têm reduzido significativamente os níveis de impurezas e trazido grandes melhoramentos na resistência à corrosão. Fundidos com grãos finos possuem usualmente uma distribuição mais uniforme de soluto e uma melhor distribuição de fases secundárias em sua estrutura NEITE³ (1996 apud MALTAIS, 2004). Eles são mais fortes e mais dúcteis, exibem melhor resistência à fadiga e usinabilidade NELSON⁴ (1948 apud MALTAIS, 2004).

A adição de zinco à liga de magnésio-alumínio causa algum reforço, embora a quantidade adicionada tenha sido limitada devido a susceptibilidade a trincas a quente que aumenta durante a solidificação. Isso se aplica particularmente a fundição sob pressão. O teor de zinco está inversamente relacionado ao teor de alumínio como mostra na Figura 8

³ NEITE G., KUBOTA K., HEHMANN F. Magnesium-based Alloys. Editores: Cahn RW, Haasen P, Kramer EJ, Material Science and Technology, A Comprehensive Treatment, Structure and Properties of nonferrous Alloys, Vol. 8 VCH Pub., 1996, pp 113-212.

⁴ NELSON CE. Grain Size Behavior in Magnesium Castings Alloys. Transaction Am Foundrymen's Society, 1948, 58:1, 1-23.

que apresenta zonas distintas possíveis de formar ligas com características de fragilidade, com probabilidade de formação de trinca a quente e com alto poder de fundibilidade. Duas ligas comuns como AZ63 e AZ91 - a última apresenta uma resistência à fadiga relativamente alta.

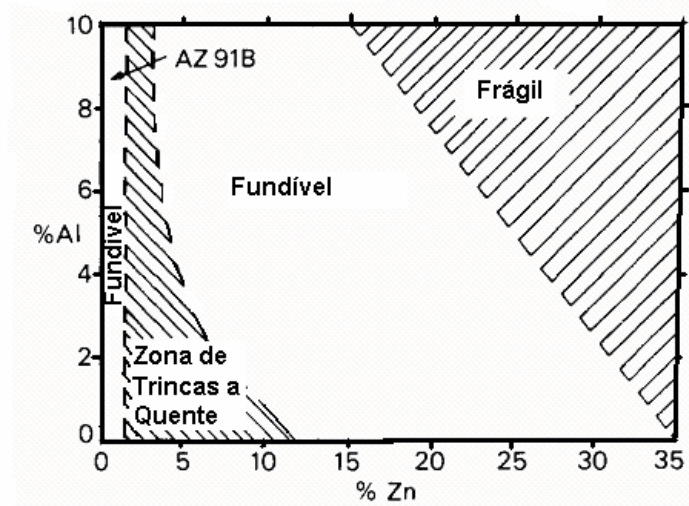


Figura 8 – Faixas de ligas Mg-Al-Zn potencialmente fundíveis. (POLMEAR, 1989).

As ligas de magnésio apresentam vários problemas práticos, e como são susceptíveis a micro-contração é preciso fazer vários experimentos para obter qualidade confiável, uma vez que a porosidade a elas associada é orientada em ângulos retos com a superfície do fundido, e tendem não a ser estanque. Embora técnicas de impregnação tenham sido desenvolvidas, elas selam a porosidade somente na região da superfície, por isso são necessárias várias camadas para atingir a estanqueidade desejada. Outras desvantagens são que as propriedades mecânicas diminuem rapidamente a temperaturas acima de 120 °C e o fato de que na condição T6, as ligas são susceptíveis de trincas de corrosão sob tensão se os níveis de tensão exceder 50% do limite de resistência (POLMEAR, 1989).

As ligas de fundição mais indicadas do sistema Mg-Al-Zn estão representadas na Tabela 6 com suas respectivas composições nominais

Tabela 6 - Composição Nominal das Ligas de Magnésio para Fundição (STANDARD SPECIFICATION FOR MAGNESIUM, 1990).

Liga ASTM	Processo de Fundição	Al %	Mn %	Zn %
AM-100A	A ou MP	10,0	0,22	0,30
AZ63A	A	6,0	0,25	3,0
AZ81A	A ou MP	7,6	0,24	0,70
AZ91C	A ou MP	8,7	0,24	0,70
AZ91E ¹	A ou MP	8,7	0,26	0,70
AZ92	A ou MP	9,0	0,22	2,0

¹ Para Fe > 0,005%. A relação Fe/Mn máxima será 0,032. LUNDER⁵ (1985 apud, ASM,2003).
 A – Areia MP – Coquilha

2.3.1.1.1 Liga AZ91C – liga de Magnésio-Alumínio-Zinco

Não existe código internacional para designação das ligas de magnésio, embora haja uma tendência para adoção do método usado pela ASTM B93 (American Society for Testing Materials) (RUDEN, ALBRIGHT, 1994). Assim, de acordo com o seguinte código, a nomenclatura apresentada na Tabela 7 das ligas de magnésio adotada pela “The Magnesium Association” consiste em que as duas primeiras letras indicam os principais elementos de liga deste sistema.

⁵ LUNDER, I. AUNE, T. K., NISANCIOGLU, K. Paper 382, apresentado na Conferência de 85 da Associação Nacional dos Engenheiros de Corrosão, 1985.

Tabela 7: Código Internacional para designação das Ligas de Magnésio (POLMEAR, 1989):

ABREVIATURA	ELEMENTO	ABREVIATURA	ELEMENTO
A	Alumínio	B	Bismuto
C	Cobre	D	Cádmio
I	Terras Raras	F	Ferro
G	Magnésio	H	Tório
K	Zircônio	L	Lítio
M	Manganês	N	Níquel
P	Chumbo	Q	Prata
R	Cromo	S	Silício
T	Estanho	W	Ítrio
Y	Antimônio	Z	Zinco

Na abreviação dos elementos de liga mais comumente usados, a letra correspondente ao elemento presente em maior quantidade na liga é usada primeiro, se estes estão em quantidades iguais as letras são listadas alfabeticamente. As duas (ou uma) letras são seguidas por números que representam a composição nominal em peso % dos principais elementos de liga arredondados para o número inteiro mais próximo, por exemplo, AZ91 indica a liga Mg-9Al-1Zn, a atual faixa de composição sendo 8,3-9,7 Al e 0,4-1,0 Zn. A seguinte designação de liga é usada tanto para ligas fundidas como para trabalhadas como apresenta a Figura 9 (GUY, 1980):

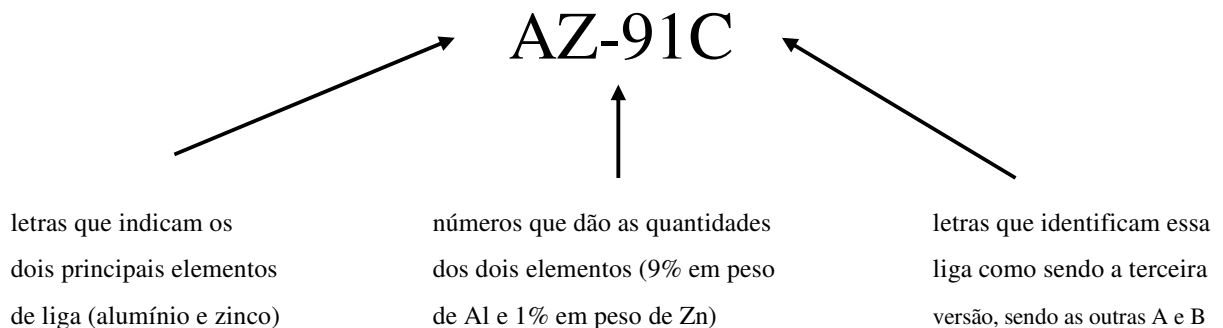


Figura 9 - Nomenclatura de uma liga de magnésio adotada pela “The Magnesium Association”.

Uma limitação é que não são dadas informações a respeito de outros elementos adicionados intencionalmente, e, caso isso ocorra, o sistema deverá ser modificado. O sufixo **A, B, C** refere-se as variações de composição dentro da faixa especificada e o **X** indica que a liga se apresenta em fase experimental (POLMEAR, 1989). A condição das ligas testadas termicamente ou endurecidas por trabalho a frio comercialmente referido como *Têmpera* é especificado por um sufixo hifenizado de acordo como seguinte código:

F - como fabricado;

T4 - solubilizado;

T5, T51 - envelhecido artificialmente (sem solubilização intencional);

T6, T61 - solubilizado e envelhecido artificialmente;

T8 - solubilizado, trabalhado e envelhecido artificialmente;

O - recozido

H10, H11 - levemente envelhecido por deformação a frio;

H23 - encruado e parcialmente recozido;

H24 - encruado e parcialmente recozido;

H26 - encruado e parcialmente recozido.

A liga AZ91C, da família magnésio-alumínio-zinco, é empregada em fundição na obtenção de fundidos em moldes de areia compactados sob pressão e moldes permanente por gravidade (coquilha) cujas propriedades gerais de engenharia estão resumidas nas Tabelas 8 a 12.

A Tabela 8 apresenta a composição limite da liga AZ91C com os respectivos limites de impurezas.

A Tabela 9 apresenta as Propriedades Mecânicas da liga a temperatura ambiente nas condições F, T4 e T6 enquanto a Tabela 10 ilustra as outras propriedades mecânicas e propriedades físicas gerais da Liga AZ 91C. As Temperaturas de fundição podem ser encontradas na Tabela 11.

A Tabela 12 reúne as Características Gerais de engenharia (fundição, galvanoplastia, usinagem, soldagem) da liga AZ91C.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Tabela 8 - Composição Limite da liga AZ91C (MATWEB, 2005).

LIGA	ELEMENTOS DE LIGA			IMPUREZAS			
	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Outros
AZ91C	8,10 - 9,30	0,40 – 1,00	0,13 – 0,35	0,30 máx.	0,10	0,01 máx.	0,30 máx.

Excesso de Impurezas – Conseqüências:

- O aumento do teor de Cu ou Ni diminui a resistência a corrosão.
- A presença de Si acima de 0,5% diminui o alongamento.

d. Propriedades Mecânicas:

Tabela 9: Propriedades Mecânicas a temperatura ambiente da liga AZ 91C na condição F, T4 e T6 (AVEDESIAN; BAKER, 1999).

Liga	AZ91C-F	AZ91C-T4	AZ91C-T6	
Resistência à tração (MPa) ¹	165	275	275	
Limite de escoamento (MPa) ¹	97	90	145	
% alongamento (base 50,8 mm) ¹	2,5	15	6	
Limite escoamento por compressão (MPa) ¹	97	90	145	
Resistência à compressão Máxima no ponto apoio (MPa) ¹	415	415	515	
Limite de escoamento por compressão no ponto apoio (MPa) ¹	275	305	360	
Dureza	HB ¹	60	55	70
	HRE ¹	66	62	77
Resistência ao Impacto Charpy V (J) ¹	0,79	4,1	1,4	
Resistência à Fadiga (MPa) ^{2,*}	80 - 95	85	85	
Resistência ao cisalhamento (MPa) ³	124	117	138	

(1) - (AVEDESIAN; BAKER, 1999

(2) Magnesium AZ91C-F, Cast. (MATWEB, 2005).

* Base: 1×10^8 ciclos de tensões invertidas determinadas através do Sistema de Teste de Fadiga por Feixe Rotatório (RBFTS – Rotating Beam Fatigue Test System) da R. R. Moore: 80 a 95 MPa

(3) – AFS, 1965

Tabela 10 - Propriedades Mecânicas e Propriedades Físicas Gerais da Liga AZ 91C

Propriedades Mecânicas - AZ91C	
Coefficiente de Poisson ¹	0,35
Módulo de Elasticidade ¹	45 GPa
Módulo de Cisalhamento	17 GPa
Características de Massa - AZ91C	
Massa Específica ¹	1,81X10 ³ kg/m ³ .
Propriedades Térmicas² - AZ91C	
Temperatura de Não Equilíbrio	420 °C
Temperatura Solidus	468 °C ¹
Coefficiente de Expansão Térmica Linear	27,2 m/mK de 20 °C a 200 °C
Calor Específico	0,8 kJ/kg a 20 °C; 1,05 kJ/kg a 100 °C ¹
	1,16 kJ/kg a 300 °C ¹
	1,43 kJ/kg a 650 °C (líquido) ¹
Condutividade Térmica	AZ91C-F – 53,6 W/mK a 79,5 W/mK,
Temperatura de Ignição ³	580 °C a 590 °C
Propriedades Elétricas⁴ - AZ91C	
Condutividade Elétrica	AZ91C - F - 11,5% IACS
	AZ91C - T4 - 9,5% IACS
	AZ91C - T6 - 11,2% IACS
Resistividade Elétrica	AZ91C - F - 150 mΩ.m
	AZ91C - T4 - 175 mΩ.m
	AZ91C - T6 - 151,5 mΩ.m
Potencial Eletrolítico	1,58 V ¹
Potencial de Hidrogênio	0,40 V ¹

1 – AVEDESIAN e BAKER, 1999.

2 - STANDARD SPECIFICATION FOR MAGNESIUM, 1990.

3 - RAVI KUMAR ET AL, 2003

4 - METALS HANDBOOK VOL 2, 1990.

e. Características de Fabricação da liga AZ91C (METALS HANDBOOK, 1990)

Tabela 11: Temperatura de Fundição

LIGA	PROCESSO	TEMPERATURA DE FUNDIÇÃO
AZ91C	MOLDE DE AREIA	705 - 845 °C
AZ91C	MOLDE PERMANENTE	650 - 815 °C

Tabela 12: Características Gerais da liga AZ91C (STANDARD SPECIFICATION FOR MAGNESIUM, 1990)

LIGA ASTM AZ91C ^b		
CARACTERÍSTICAS DE FUNDIÇÃO ^c	Tolerância de Contração (mm/m) ^b	13,0
	Estanqueidade	2
	Fluidez ^d	1
	Tendência a microporosidade ^e	2
	Tratamento térmico	SIM
OUTRAS CARACTERÍSTICAS ^c	Usinagem ^f	1
	Galvanoplastia ^g	2
	Tratamento superficial ^h	2
	Susceptibilidade a brasagem ⁱ	não
	Susceptibilidade a soldagem ^j	2

b - tolerância de fundidos. Exigência de contração do fundido variará com a complexidade e as dimensões do desenho

c- categoria 1 indica o melhor do grupo e 3 o pior.

d- capacidade da liga líquida fluir prontamente no molde preenchendo as seções finas

e- baseado em evidências radiográficas

f- taxa composta baseada na facilidade de corte, característica do cavaco, qualidade final e tempo de vida da ferramenta;

g- capacidade do fundido reter a galvanoplastia aplicada por método padrão;

h- capacidade do fundido ser limpo em solução de decapagem para estar sujeito a melhor adesão de tinta;

i- susceptibilidade da liga de resistir a temperatura de brasagem sem distorção excessiva ou fusão;

j- baseado na capacidade do material ser soldado fusão com arame de adição de mesma liga ou de uma liga cuja composição seja recomendada.

A Nomenclatura utilizada internacionalmente para a Liga AZ91C encontra-se evidenciada na Tabela 13 de acordo com os códigos de cada país. Observa-se que cada norma adota uma codificação ou um número identificador para especificar a liga em referência.

Tabela 13 - Especificações Técnicas Internacionais da Liga de Magnésio AZ-91C

Tabela 13A - Especificação Americana da Liga AZ-91C em Moldes de Areia

LIGA	ESPECIFICAÇÃO AMERICANA					
	ASTM DESIGNAÇÃO DE LIGA E TEMPERA	ESPECIFIC. ASTM	AMS	SAE	UNS	MIL ESPECIFIC.
AZ91C como fundido	AZ91C-F	B80-76	-	504	M11914	QQ-M-56B
AZ91C solubilizado	AZ91C-T4	B80-76	-	504	M11914	QQ-M-56B
AZ91C solubilizado e envelh. artif.	AZ91C-T6	B80-76	4437	504	M11914	QQ-M-56B MIL-M 460 62B

Tabela 13B - Especificação Inglesa e Especificação Russa

LIGA	ESPECIFICAÇÃO INGLESA ¹			ESPECIFIC RUSSA
	D.T.D SERIES	BRITISH STANDARDS SERIES		
DESIGNAÇÃO E CONDIÇÃO		AIRCRAFT	GENERAL ENGINEERING	
AZ91C -F (Como fundida)	-	-	2970 MAG3-M	ML6
AZ91C-T4 (Solubilizada)	-	3L.124	2970 MAG3-TB	ML6
AZ91C-T6 (Solubilizada e envelhecida artificialmente)	-	3L.125	2970 MAG3-TF	ML6

Tabela 13C - Especificação Alemã e Especificação Francesa

ESPECIFICAÇÃO ALEMÃ			ESPECIFICAÇÃO FRANCESA			
DESIGN. e COND.	AIRCRAFT NUMBER	DIN 1729 NUMBER	DESIGNAÇÃO COMERCIAL	AIR 3380	AFNOR	STANDARD AECMA
AZ91C – F	-	G-MgAl 9Zn1	FT	G-A9	G-A9	MG-C-61
AZ91C –T4	3.5194	-	FT	G-A9	G-A9	MG-C-61
AZ91C –T4	3.5194	-	F10	G-A9Z1	G-A9Z1	-

¹ - A especificação inglesa refere tanto a fundidos em modelos de areia como em moldes permanentes por gravidade. Esta especificação refere-se somente a fundidos em areia.

G = Fundido em areia

2.3.1.1.2 AZ91C - Influência dos elementos de liga

Os elementos de liga presentes na formação da liga AZ91C definem suas propriedades e características de fundição, proporcionando desempenho e eficiência nas aplicações industriais.

Magnésio – O magnésio como a maioria dos metais puros, é macio, moderadamente dúctil e tem baixa resistência mecânica. Portanto, suas propriedades melhoram consideravelmente, quando ligado a outros metais, tornando-o apropriado a muitas aplicações. Os principais elementos de liga usados para causar melhoramentos gerais ou específicos nas propriedades do magnésio são o alumínio, manganês e zinco. O percentual de alumínio varia de 3 a 13%, o manganês de 0,1 a 2% e o zinco varia de 0 a 3,5%(WOLDMAN, 1946).

Cobre, níquel, cádmio, estanho, prata e outros metais não ferrosos ligados ao magnésio não são considerados elementos de liga nas ligas comercialmente fundidas de magnésio. Outros elementos não tão freqüentemente são o cério, o zircônio e o silício (WOLDMAN, 1946).

Alumínio – O alumínio é o mais importante elemento de liga presente nas ligas de magnésio. Elemento endurecedor. Aumenta o limite de resistência à tração, o escoamento, a resistência à compressão e dureza, devido à formação de solução sólida magnésio-

alumínio (WOLDMAN, 1946; BARÃO, 1978). O aumento do teor de Al torna a estrutura de grão mais susceptível ao refino, aumentando a resistência e a dureza e diminuindo a ductilidade pela presença do composto Mg_4Al_3 , precipitado no contorno de grão. O alumínio aumenta a fluidez da liga⁶ (1943 apud BEREZIN, 1962); e facilita o refino de grão. Em teores de até 9% melhora a resistência à corrosão atmosférica, mas acima de 9% tem pouco efeito protetor, porque as películas de óxido que recobrem a peça são muito finas. As ligas com teores acima de 13% são muito quebradiças devido ao aparecimento de uma rede eutética de magnésio-alumínio e solução sólida α no contorno do grão. Assim, os teores de alumínio são limitados a 10% para evitar fragilização, o que permite que possam ser tratados termicamente com aumento na resistência e na dureza (WOLDMAN, 1946). Vide Figura 7 - Diagrama Equilíbrio Mg-Al.

Manganês – O manganês tem pouca influência nas características mecânicas das ligas, aumentando levemente o limite de escoamento. Nas ligas de magnésio contendo alumínio, o manganês melhora a soldabilidade e aumenta a resistência à corrosão, neutralizando o efeito do ferro (WOLDMAN, 1946; BARÃO, 1978). Na temperatura de fusão do magnésio, o manganês é solúvel na faixa de 0,12%, porém, com variações de temperatura esta solubilidade atinge proporções de 1 - 2 % e soluções supersaturadas nestas condições são fáceis de serem obtidas na fusão. A solução sólida magnésio-manganês nesta concentração possui uma resistência a corrosão que é superior à do manganês puro (METAUX, 1973). Na prática não é possível adicionar mais que 2,5% de Mn, sendo mínima sua influência sobre as propriedades mecânicas nas ligas fundidas. Normalmente em ligas de magnésio-alumínio o manganês está compreendido entre 0,10 e 0,5%. O manganês tende a precipitar apresentando dificuldade de retornar à solução mesmo que atinja a temperatura de vazamento quando o metal fundido é retido em temperatura abaixo de 675 °C por determinado tempo (WOLDMAN, 1946). Vide Figura 10 - Diagrama de Equilíbrio Mg-Mn.

⁶ The Sand Casting Magnesium Alloys. The Metal Industry, page 226 apr, 1943.

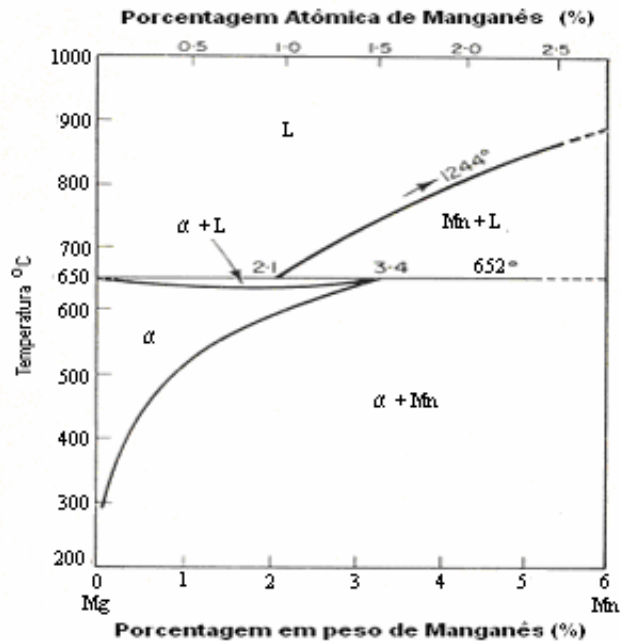


Figura 10 - Diagrama de Equilíbrio Mg-Mn (EMLEY, 1966).

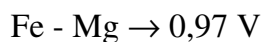
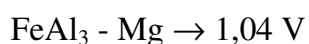
Zinco - O zinco proporciona, sob condições, salinas resistência à corrosão inibindo-a em presença de impurezas como ferro e cobre. Em liga de alta resistência é um importante elemento de liga, embora na prática não seja usado sozinho, mas em combinação com o alumínio. Em teores abaixo de 3% melhora a fundibilidade das ligas de magnésio-alumínio (WOLDMAN, 1946). Adições acima de 3% produzem fragilidade a quente, trincas e falta de estanqueidade, pela formação do composto $MgZn_2$ (WOLDMAN, 1946), (BARÃO, 1978). Altos teores de zinco causam vazios intergranulares ou microporosidades. O zinco não altera a microestrutura da fase magnésio-alumínio. Muda o aspecto do eutético pela formação de um eutético chamado 'eutético separado' com o composto Al-Mg rodeado pela solução sólida. O zinco é menos solúvel no magnésio do que o alumínio e o componente $MgZn_2$ reduz consideravelmente o alongamento da liga (WOLDMAN, 1946). Não é usado em ligas binárias com magnésio, porque o acréscimo das propriedades mecânicas conferidas pelo zinco se realiza a custa de um rápido aumento de densidade. É usado em ligas ternárias Mg-Al-Zn para melhorar a ductilidade destas (BARÃO, 1978).

2.3.1.1.3 Efeito dos elementos residuais presentes

Silício - O silício em quantidades acima de 0,5% tende a aumentar a fragilidade nas ligas a base de magnésio e, portanto, não é permitido usar em quantidades maiores que 0,3% (máx.).

É aconselhável fundir o magnésio em cadinhos de aço para reduzir ao máximo a contaminação pelo silício que se decompõe facilmente na fusão com o magnésio formando o composto Mg_2Si , muito estável, mas frágil. O silício por não ser solúvel no magnésio forma este constituinte que se precipita na forma de cristais lamelares, duros e frágeis (WOLDMAN, 1946). Esta redução da ductilidade do magnésio pelo Mg_2Si é prejudicial. Dessa forma, deve ser evitada a introdução de sílica no banho de magnésio pela sucata (ASM, 1965).

Ferro - O ferro é uma das impurezas mais críticas em respeito à corrosão e o principal responsável pela sensibilidade à corrosão do magnésio comercial. O Ferro precipita uma segunda fase que acelera o ataque corrosivo e não as variações da solução sólida. Para o ferro existe um limite de tolerância que corresponde aproximadamente ao limite de solubilidade do ferro no magnésio. O efeito do ferro aumenta em ligas de magnésio-alumínio, porque o volume da segunda fase e a diferença de potencial é maior (ASM, 1965):



Níquel e Cobre - São impurezas indesejáveis porque diminuem sensivelmente a resistência à corrosão nas liga de magnésio, especialmente a corrosão do tipo 'pitting' em meio aquoso. Devem ser mantidos a um mínimo para assegurar a máxima resistência à corrosão nestes meios (BEREZIN, 1962).

2.3.1.2 Ligas do sistema Magnésio-Zinco-Zircônio

Zinco é também o principal elemento de liga e o diagrama de equilíbrio mostrado na Figura 11, mostra em que condições de equilíbrio o zinco forma com o Magnésio uma solução sólida com 8,4% de Zn, a 341°C, e diminui por volta de 1,7%, à temperatura ambiente.

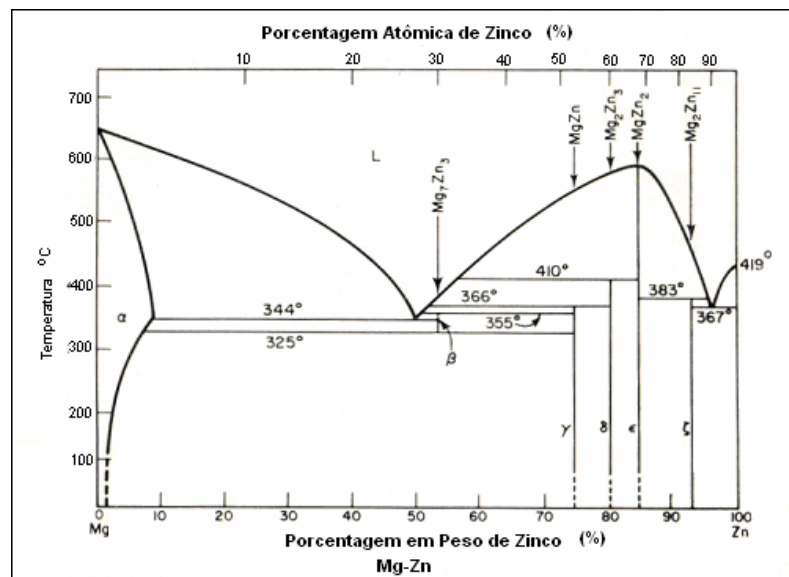


Figura 11 - Diagrama de Equilíbrio Mg-Zn (EMLEY, 1966).

As ligas contendo alto teor de zinco são mais susceptíveis a defeitos conhecidos como microporosidades, mas as que contêm de 2 % a 6% possuem boas propriedades de fundição, que são obtidas com o auxílio do refino de grão pelo zircônio, e a adição de tório e cério confere resistência a altas temperaturas e ambiente.

Suas características de fundição as fazem as mais aceitáveis ligas de magnésio fundidas. Testes em grandes fundições têm mostrado alto grau de consistência nas propriedades mecânicas.

Entretanto pesquisas subseqüentes têm mostrado que a adição de aproximadamente 1,5% de terras raras melhora as características de fundição com pequenos efeitos nas propriedades mecânicas fazendo deste um material livre de porosidade e de fácil fundição

para peças complexas. Pode também ser soldado satisfatoriamente, visto que não é muito susceptível a trincas a quente (BRACE, 1957).

2.3.1.3 Ligas do sistema Magnésio contendo metais de Terras Raras

Apesar das ligas para fundição baseadas no sistema magnésio-alumínio e magnésio-zinco poderem ser utilizadas em temperaturas de operação de até 150 °C ou mais, chegou-se a necessidade, na tecnologia moderna, de ligas leves que operam em temperaturas muito maiores. O comportamento à fluência destas ligas é especialmente importante. Para minimizar a fluência é desejável um bloqueamento efetivo dentro dos grãos e especialmente nos contornos de grãos por precipitados estáveis a temperaturas elevadas. Para minimizar a fluência é também desejável uma alta temperatura de recristalização (FINARDI, 1971).

O grupo de ligas de *magnésio-metals de terras raras* tem muito boa resistência à fluência e resistência à tração no intervalo de temperatura de 150 a 260 °C. Estas propriedades dependem de adição de zircônio para refino de grão. Uma das ligas mais importantes do grupo é a liga EZ33A.

A liga de *magnésio-metals de terras raras* não tem problemas com relação a microporosidades e trincas de solidificação. Este comportamento está provavelmente associado ao pequeno intervalo de solidificação destas ligas. São também as ligas que apresentam melhor resistência à corrosão entre as ligas de magnésio (FINARDI, 1971).

2.3.1.4 Ligas do sistema Magnésio-Tório

As ligas de magnésio-tório apresentam boa resistência em temperaturas elevadas, porém em grau mais acentuado: são ligas que apresentam resistência à fluência no intervalo de temperatura de 250 °C a 300 °C. As propriedades desta liga dependem do zircônio para obter-se refino de grão (FINARDI, 1971).

Um fato interessante foi a descoberta de uma liga contendo por volta de 5,8% zinco, 1,8% tório e 0,7% zircônio que apresenta alta resistência à tração a temperatura ambiente com um limite de escoamento na ordem de 131×10^6 Pa (9,5 tons/in²), limite de resistência de 234×10^6 Pa (17 tons/in²) e 5,0% de alongamento. As ligas magnésio-tório fornecem peças livres de microporosidades e trincas de solidificação. São, entretanto, muito sensíveis à oxidação antes do vazamento (BRACE, 1957).

Dois outros elementos de liga são importantes. O primeiro deles é o lítio com 11% do qual se adicionado no magnésio irá produzir uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado ao invés de uma hexagonal normal. O material é produzido em forma chapas e apresenta boas propriedades de conformação a temperatura ambiente. O alto preço do lítio e a reatividade destas ligas têm sido desfavoráveis para seu desenvolvimento comercial (BRACE, 1957), tendo em vista que desde seu desenvolvimento em 1960 têm encontrado aplicações limitadas e não estão normalmente disponíveis comercialmente (AVEDESIAN; BAKER, 1999).

O outro é o cádmio que é facilmente solúvel no magnésio que pode ser usado para obtenção de ligas para extrusão ou laminação, uma vez que ele forma solução sólida contínua. Este tem sido proposto na utilização de ligas em conjunto com zircônio.

A propriedade de moldagem a frio do cádmio contém ligas que parecem ser ligeiramente melhores em alguns aspectos daquelas baseadas em zinco (BRACE, 1957).

2.4 PROCESSOS DE FUNDIÇÃO APLICADOS ÀS LIGAS DE MAGNÉSIO

2.4.1 Processos mais usados na fundição das ligas de magnésio

Devido à importância primordial do molde e aos vários processos e materiais usados para a sua confecção, os processos básicos da fundição são caracterizados pelo processo de moldagem empregado. Para as ligas de magnésio fundidas os processos de moldagem, normalmente usados, são classificados em três grupos de processos distintos:

1. *Fundição em areia;*
2. *Moldes permanentes ou semi-permanentes por gravidade (coquilhas);*
3. *Fundição sob Pressão.*

O Processo a ser aplicado na obtenção de um fundido depende de vários fatores. *Moldes de areia*, por exemplo; são necessários em fundidos grandes ou que apresentem configuração complexa, núcleos com machos, etc. Os fundidos em areia são usados extensivamente e abrangem o grande consumo das ligas de magnésio, por oferecerem baixo custo, facilidade e simplicidade na obtenção de peças simples, complexas com tolerâncias dimensionais aceitáveis. Os *moldes permanentes por gravidade* são aplicados em fundidos do mesmo modelo, cuja quantidade obtida justifique o custo da peça ou da matriz. Já em *fundição sob pressão* a quantidade produzida se aplica a fundidos pequenos com tolerâncias dimensionais apertadas e custo de acabamento sendo mantido o mais baixo possível. A tolerância dimensional dos fundidos em *moldes permanentes por gravidade* é intermediária entre os obtidos em *moldes de areia* e *sob pressão*. Quanto ao acabamento eles se aproximam dos fundidos obtidos em moldes sob pressão.

Outros processos de fundição são aplicados em menor escala como moldagem em casca (Shell Molding), areia seca e fundição de precisão (Investment Casting) que podem ser aplicados no desenvolvimento de peças fundidas, dependendo das características de projeto, das prioridades quanto ao acabamento, tolerâncias dimensionais e aplicação (WOLDMAN, 1946).

2.4.1.1 Fundição em areia

Método mais utilizado para obtenção de fundidos de aplicação industrial. Modelos de madeira são freqüentemente empregados na obtenção de poucas peças e os de metal, onde há maior quantidade de produção. O processo não limita o tamanho do fundido ou complexidade do macho, entretanto se obedece a considerações de fundição, tais como: espessura de seção de peças, canais de alimentação, alimentadores, resfriadores, temperatura de vazamento, velocidade de vazamento, permeabilidade, teor da mistura de

areia e alguns outros fatores que influenciam na velocidade de solidificação, que causam efeitos nas propriedades mecânicas do fundido.

As ligas de magnésio fundidas apresentam baixa resistência mecânica em temperaturas abaixo à temperatura da solidificação proporcionando trincas no fundido caso não ocorra a livre contração do metal. Portanto, os moldes de areia devem ser macios e os machos devem amolecer a baixas temperaturas a fim de se obter fundidos saudáveis de boa qualidade. O baixo peso específico das ligas de magnésio requer a colocação de respiros extras para remoção dos gases do molde. Inibidores da oxidação também são usados tanto nos moldes de areia verde ou seca. Ligas fundidas em areia permitem obter fundidos com espessura de parede mínima 4,8 mm. A tolerância de contração para o modelo é 13 mm/m (WOLDMAN, 1946).

2.4.1.2 Moldes permanentes por gravidade

Algumas ligas de magnésio fundidas em areia podem ser fundidas com grande sucesso em moldes permanentes, que apresentam a vantagem de obter fundidos com dimensões mais exatas e com melhor acabamento superficial, que os fundidos em areia, além de baixo custo em grandes quantidades produzidas. As dimensões podem ser controladas com maior precisão do que em moldes de areia e a usinagem ou polimento superficial mostra maior isenção de defeitos. O processo permite produzir fundidos com sensível economia de peso devido a capacidade de projetar fundidos com limites estreitos e com paredes mais finas. O processo de fundição em moldes semi-permanentes usa machos de areia em vez de machos de aço permitindo maior complexidade no desenho interior da peça. O molde é feito em ferro fundido com baixo fósforo e os machos menos complexos, de aço rápido (WOLDMAN, 1946).

O aquecimento do molde deve ser feito na faixa de 260 °C a 400 °C. Para evitar trincas é introduzido dióxido de enxofre na cavidade do molde antes do vazamento para prevenir a queima. Em geral, fundidos para serem produzidos em moldes permanentes devem possuir um desenho relativamente simples com seção de parede bastante uniforme

sem rebaixos ou colocação de machos internos complicados. Um sistema de alimentação e alimentadores deve ser empregado para introduzir o metal líquido na cavidade do molde, assegurando que a quantidade de metal alimentado seja adequada evitando assim a contração líquida e de solidificação (TROVANT, ARGYROPOULOS, 1996). Esse sistema deve ser projetado respeitando o plano de apartação do molde de modo que o fundido possa ser removido quando o sistema for aberto (WOLDMAN, 1946).

2.4.1.3 Fundição sob pressão

O processo convencional de fundição sob pressão é baseado na injeção de um metal completamente líquido na cavidade de uma matriz, enquanto que a fundição de metal semi-sólido usa metal fundido em estado pastoso que contém certa fração de volume de sólido. Este processo confere alguns benefícios, o mais notável é que um processo de preenchimento laminar do molde causa menos aprisionamento de ar e menos porosidade devido à solidificação (KOREN ET AL, 2002).

Por outro lado, o processo de fundição sob pressão oferece muitas vantagens e é adaptado à produção de fundidos onde a precisão nas dimensões, uniformidade e acabamento superior são essenciais. Neste processo, os fundidos podem ser obtidos com paredes muito finas e economia de peso nas peças acabadas. Furos podem ser obtidos com pouca tolerância e as dimensões podem ser mantidas estreitas para reduzir as operações de usinagem a um mínimo, simplificando as operações de acabamento e polimento. Assim o custo da matriz é tal que o processo é adequado a grandes produções. A maior vantagem da fundição sob pressão é a rapidez de produção dos fundidos que são cópias exatas da matriz, a baixo custo (WOLDMAN, 1946).

A fundição sob pressão é feita pela injeção do metal sob pressão de 27,6 MPa a 345 MPa causando o enchimento de todas as partes da matriz de aço temperado resfriado a água. O metal fundido é despejado na câmara fria e é deslocado para frente por meio de um pistão forçando a entrada do metal através dos canais para dentro da cavidade do molde. O metal é protegido com dióxido de enxofre para evitar oxidação. A matriz é

projetada em aço ferramenta para poucas corridas e um tipo de aço ferramenta resistente ao calor e endurecido com cromo-tungstênio é projetado para matrizes de vida longa (WOLDMAN, 1946).

O projeto leva em consideração canais de alimentação, respiros, ângulos de curvatura e de saída e arredondamento de cantos finos permitindo obter peças com elevado padrão de qualidade (WOLDMAN, 1946).

2.4.2 Moldagem em areia verde e sua aplicabilidade nas ligas de magnésio

O processo de moldagem em areia verde é o mais largamente usado de todos os processos aplicados às ligas de magnésio fundidas, porque permite obter moldes de várias espessuras e tamanhos, e ajustar-se com facilidade a produção de fundidos em larga escala.

A sua aplicabilidade na produção de fundidos de magnésio é visível por apresentar um diferencial em relação a outros processos: o baixo custo, que reflete significativamente no custo global do fundido.

A baixa susceptibilidade a distorção em relação que os fundidos obtidos em moldes pelo processo de moldagem em areia seca cujos moldes sofrem estufagem (secagem em estufa) representa um aumento considerável na produtividade de fundidos.

As caixas de moldagem usadas no processo a verde são prontamente reutilizadas no menor tempo possível gerando dinâmica e flexibilidade ao processo.

A precisão dimensional dos moldes no plano de apartação das caixas de moldagem garantem a aplicabilidade das peças obtidas, além do baixo risco na formação de trincas a quente do que os observados em outros tipos de molde. Assim o processo de moldagem em areia verde apresenta considerações que fazem com que sua escolha o torne um dos mais aplicáveis às ligas de magnésio fundidas, face à adaptabilidade aos processos de moldagem manuais ou mecanizados empregados na fundição do magnésio (METALS HANDBOOK, 1996).

2.4.3 Particularidades específicas das areias, aglomerantes e inibidores usados na moldagem das ligas de magnésio

As propriedades físicas das areias apropriadas para moldagem das ligas de magnésio são determinadas pelo peso específico e pela química do metal em altas temperaturas. Como o peso específico a 700 °C não é mais que 1500 kg/m³, o metal líquido apresenta menor pressão metalostática, razão pela qual as areias de moldagem para o magnésio devem ser bem ventiladas diferente daquelas aplicadas para ferro fundido e outros metais pesados (BRACE, 1957). As areias de moldagem usadas na preparação dos moldes podem ser naturais ou sintéticas. As areias naturais contêm na ordem de 10 a 12% de argila, 5% de água e uma permeabilidade máxima de 50 AFA. Estas areias têm a vantagem de apresentar uma boa superfície de acabamento do molde e facilidade de manuseio na preparação do molde na fundição. Entretanto, o controle das suas propriedades é dificultado desde a composição que depende do tipo de areia usada para moldagem (WOLDMAN, 1946).

As areias sintéticas são de tamanho de grão razoavelmente grande obtidas de areias a base de sílica lavada e classificada da qual a argila natural foi retirada. Essas areias oferecem alta permeabilidade e são usadas no lugar das naturais, pouco recomendadas por apresentar uma mistura de grãos de silício de tamanhos variados, onde grãos finos ocupam os interstícios deixados pelos grãos maiores, diminuindo a permeabilidade (WOLDMAN, 1946).

Como as areias sintéticas consistem normalmente de uma mistura de sílica lavada, argila e água, outros ingredientes são adicionados para conferir as propriedades necessárias e ajustar a composição da mistura com esses materiais previamente conhecidos. Isto permite manter as propriedades através da padronização e controle destes ingredientes, que são a base para o sucesso da técnica de fusão do magnésio (BRACE, 1957).

Na prática os elementos de composição de areias de moldagem usadas em ligas de magnésio fundidas diferem da maioria dos elementos usados na moldagem de outros metais ou ligas, devido às medidas de precaução que devem ser tomadas para prevenir a reação metal-molde (METALS HANDBOOK, 1996).

A areia a ser utilizada na fundição deve estar seca antes do uso. Sabe-se que quando 80% de uma areia de moldagem para ligas de magnésio fica retida na peneira adjacente maior com menor proporção de finos a permeabilidade será adequada ao processo de moldagem. A prática requer que a areia deve ter, tanto quanto possível grãos de tamanho uniforme (BRACE, 1957).

Portanto, a *areia base*⁷ (areia silicosa usada em moldagens) cujo *módulo de finura*⁸ varia de 65 a 100 AFS e com 70% ou mais dos grãos retidos nas peneiras adjacentes de n° 3 ou 4 é usada em muitas fundições do magnésio. Em geral essas areias podem usar grãos na forma arredondada, angular e sub-angular, como mostra a Figura 12a e 12b, e atender satisfatoriamente as necessidades de moldagem com pequenos ajustes na formulação (BROSCH, 1952).

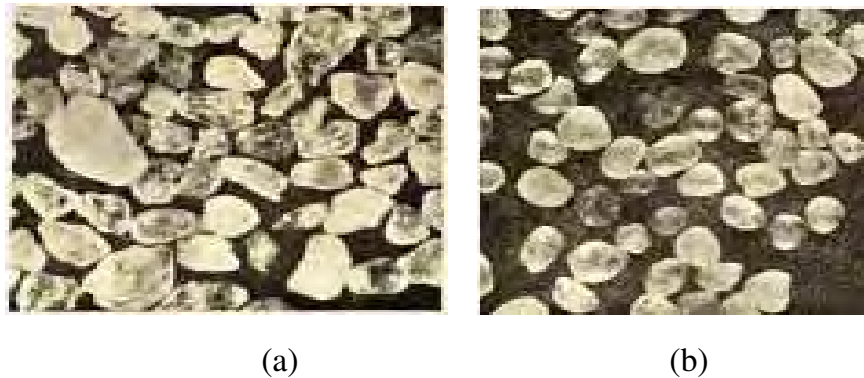


Figura 12 – (a) Areia com grãos sub-angulares (b) Areia com grãos angulares (BROSCH; LO RÉ, 1965).

⁷ *Areia base* – agregado mineral granular, constituinte básico das diversas areias de moldagem.

⁸ *Módulo de finura* – Tamanho de grão ideal médio, medido pelo número de malhas da peneira cuja abertura de malha seria igual ao seu diâmetro.

Assim, para gerar alta permeabilidade, grandes poros entre grãos servem para permitir a livre passagem dos gases do molde para a atmosfera. Entretanto, grãos finos, argila e agentes inibidores adicionados às areias de moldagem contribuem significativamente para diminuir a permeabilidade. Assim, para produzir fundido de boa qualidade é necessário produzir moldes em que haja uma combinação entre uma boa superfície de acabamento e ventilação apropriada (BROSCH, 1952).

Como as argilas são partes integrantes da composição das areias de fundição sintéticas, para conferir-lhe consistência e plasticidade esse aglomerante mineral faz parte da composição das areias usadas na moldagem e fundição das ligas de magnésio.

Os estudos tecnológicos realizados com as argilas mostram que esse aglomerante natural chamado de *bentonita*⁹ apresenta características próprias de aglomeração adequados às areias sintéticas usadas na fundição de ligas de magnésio.

As bentonitas, em função do tipo de íon adsorvido, mudam de comportamento. As bentonitas sódicas possuem sódio Na^+ como principal adsorvido (85,8 m e/ 100g) e apresentam pH 9,2 em suspensão aquosa (reação alcalina) (BROSCH; LO RÉ, 1965).

As bentonitas cálcicas possuem cálcio Ca^{++} como principal íon adsorvido (64,7 m e/100¹⁰) e apresentam pH = 6,2 quando em suspensão aquosa (reação ácida) (BROSCH; LO RÉ, 1965).

Essas bentonitas, tanto a sódica e cálcica, são as bastante aceitáveis como aglomerantes na ligação da água com a areia de moldagem. Já outros tipos de argilas por apresentarem ligações fracas requerem 6 a 12% de adição comparadas com somente 3 a 4% das bentonitas para que possam desenvolver comparável resistência. Essas argilas diminuem a permeabilidade e requerem elevadas adições de água.

Assim, a bentonita sódica confere tenacidade a uma areia umedecida de modo apropriado, isto significa uma combinação de alta resistência e deformação. Por outro

⁹ *Bentonita* – aglomerante mineral da classe das areias montmoriloníticas provenientes de alterações de cinzas vulcânicas proposta por Ross e Shamon, 1926.

¹⁰ m e – mili equivalente em mohs – unidade usada para caracterização da intensidade de troca iônica redirecionada com o grau de adsorção iônica dada pela concentração do íon NH_4^+ por litro de solução o grau de adsorção iônica dada pela concentração do íon NH_4^+ por litro de solução.

lado, a bentonita cálcica confere elevada resistência a verde com baixa deformação produzindo uma areia quebradiça (frágil). Tanto que algumas fundições misturam as duas bentonitas para obter uma melhor propriedade. Essa mistura confere maior resistência a temperaturas elevadas, que cada uma em separado, pouco significante para o magnésio (BROSCH, 1952).

Quanto aos inibidores de areia de moldagem, os mecanismos pelos quais esses funcionam não são completamente conhecidos, mas têm sido descritos por três reações principais:

1- Formação de um filme protetor na superfície da liga de magnésio fundida quando entra e toma a forma no molde de areia.

2- Formação de uma atmosfera protetora na cavidade do molde;

3- Formação de um revestimento protetor ao redor dos grãos de areia do molde.

A formação de um filme protetor na superfície do metal é indubitavelmente a mais importante das três razões e é a base para o sucesso dos inibidores mais importantes. As atmosferas protetoras são benéficas, mas são incapazes de conferir proteção adequada quando existem fundidos de seções espessas. A formação de um revestimento protetor ao redor dos grãos é a de menor importância, mas sob condições favoráveis o revestimento irá prevenir reações com fundidos de paredes finas.

O Enxofre é um dos mais antigos inibidores usados universalmente. Ele volatiliza no molde a baixa temperatura e entra em contato com o metal líquido formando vapor de enxofre. O vapor do enxofre reage com o metal e forma um filme superficial protetor e, reage também com o vapor de água formando o dióxido de enxofre. O dióxido de enxofre formado reage com o metal resultando a proteção superficial adicional. As adições de 0,5% a 2% em peso oferecem excelente proteção inicial e são adequadas a fundidos de seção leve (AFS, 1965).

Fundidos de seção pesada podem ser vazados em moldes de areia com enxofre, mas nesse caso sua adição aumenta de 4% a 8% em peso. Aumentando a adição do enxofre há

a formação do gás SO₂ dentro do molde que necessita por sua vez do uso de uma areia permeável prejudicando o acabamento superficial do fundido (AFS, 1965).

A Tabela 14 apresenta alguns dos inibidores mais comuns agrupados por classe.

Tabela 14 - Inibidores mais comuns agrupados por classe (AFS,1965).

Filme de Proteção Superficial	
Enxofre	S
Borofluoreto de Amônio	NH ₄ BF ₄
Fluorsilicato de Amônio	(NH ₄) ₂ SiF ₆
Fluoreto de Amônio	NH ₄ F.HF
Fluorborato de Potássio	KBF ₄
Fluorborato de Sódio	NaBF ₄
Fluoreto de Alumínio	AlF ₃
Atmosfera Protetora	
Enxofre	S
Tricloreto de Boro	BCl ₃
Dióxido de Enxofre	SO ₂
Trifluoreto de Boro	BF ₃
Dietileno Glicol	Etanol 2,2 oxybis
Cobertura do Grão de Areia	
Carbono	C
Ácido Bórico	H ₃ BO ₃
Dietileno Glicol	Etanol 2,2 oxyb

Os fluoretos voláteis, tais como o *fluosilicato de amônia* e *borofluoreto de amônia*, fornecem excelente proteção com adições que variam de 1% a 4% em peso. Esses inibidores não são tão voláteis quanto o enxofre, mas conferem uma boa inibição (AFS, 1965).

Os fluoretos metálicos, tais como *fluoreto de potássio* e *fluoborato de sódio* são inibidores relativamente estáveis que se decompõem a temperatura acima de 540 °C. Eles não fornecem proteção inicial, mas são adições benéficas em fundidos que apresentam grandes seções e que resfriam lentamente (AFS, 1965).

O ácido bórico se equipara com o enxofre como um dos mais antigos inibidores. Contudo pouco se sabe sobre sua reação no molde ou com o metal fundido. Sua eficácia é decididamente menor que o enxofre ou os fluoretos voláteis. As taxas de adições usuais variam de 0,25% a 2%.

O dietileno glicol é freqüentemente adicionado por três razões: 1) Para reduzir a umidade de areia de moldagem; 2) Para aumentar a vida útil da areia de moldagem para redução da taxa de perda de umidade; 3) Como inibidor em combinação com o ácido bórico. O dietileno glicol (ou outros glicóis) é freqüentemente adicionado na faixa de 0,5% a 2%. Na presença do ácido bórico formam um inibidor potente. Acredita-se que o ácido bórico e o dietileno glicol reagem para formar o etilborato, que produz ação inibidora (AFS, 1965).

Grãos de areia recobertos com carbono são encontrados em moldes de areia verde com aglomerante sem água. A reciclagem desse tipo de areia de moldagem desenvolve um grau de proteção além do esperado para inibidores residuais sozinhos.

O dióxido de enxofre é usado antes do vazamento para expurgar a atmosfera na maioria dos moldes para fundidos médios ou grandes. O triclureto de boro e trifluoreto de boro podem ser usados com a mesma finalidade, mas a sua toxicidade tem evitado sua aplicação comercial. O dióxido de enxofre dilui a atmosfera do molde e reduz a quantidade de vapor de água no molde, fornecendo um certo grau de proteção, sendo provável que sua maior proteção seja desenvolvida pela formação de um filme superficial no metal.

A quantidade necessária de inibidor na areia de moldagem depende, sobretudo dos seguintes fatores (AFS, 1965):

1- Teor de água na areia de moldagem - quanto mais baixo a umidade da areia, se mantido constante os outros fatores, menor quantidade do inibidor será necessária.

2- Temperatura de vazamento do metal - Quanto mais alta a temperatura de vazamento, maior será a reatividade da liga, conseqüentemente maiores quantidades de inibidores serão necessárias.

3- Taxa de resfriamento do fundido no molde - Quanto mais espesso o fundido, mais lento será o resfriamento. Os inibidores voláteis logo serão perdidos na interface areia-molde, necessitando de reposição a uma distância da superfície do molde até o metal solidificar (AFS, 1965).

Portanto, os inibidores aplicados nas areias de moldagem das ligas de magnésio fazem parte de um grande número de composições e misturas encontradas e aplicadas em processos de moldagem típicos praticadas na Inglaterra, Estados Unidos da América e França, que de acordo com a técnica desenvolvida adotam composições adequadas às necessidades do projeto em desenvolvimento.

As composições mais comuns utilizadas nestes países estão contidas nas tabelas 15 a 17.

Tabela 15 - Mistura típica Inglesa (BRACE, 1957).

Areia silicosa	45,4 kg
Bentonita	1,8 kg
Ácido Bórico	0,6 kg
Enxofre	1,8 kg
Água	2,2 l

Os ingredientes são adicionados pela ordem e misturados até que os indicadores da areia ofereçam a coesão correta. É conveniente verificar o teor de água e a permeabilidade que deve estar por volta de 120 – 150 AFA.

As misturas Americanas apresentam composições variadas que atendem suas necessidades de processo e servem de referência para aplicação nos processos de moldagem das Ligas de Magnésio Fundidas:

Tabela 16 - Mistura típica Americana.(AFS, 1965).

Areia Silicosa	MF-65 - Restante %
Bentonita	3%
Enxofre	1,5 – 2%
Ácido Bórico	1,5 – 2%
Dietilenoglicol	1,5% - 2%
Fluoborato de Potássio	0,5%
Água	2,5 – 3,2%

Tabela – 17 - Mistura Francesa Aplicada na Moldagem de Rodas de Avião (CAILLON, 1933).

Areia Natural	10 kg
Areia Branca Silicosa	30 kg
Fluoreto de Amônio	1,5 kg
Enxofre	0,4 kg
Ácido Bórico	0,4 kg
Água	2,1 l

2.4.4 Características e propriedades determinantes das areias na moldagem das ligas de magnésio

As características de uma areia de moldagem são determinantes no processo de moldagem, influenciando na preparação do molde, nas propriedades específicas de moldagem, na obtenção da peça fundida e na qualidade do produto obtido.

Essas características apresentam algumas propriedades intrínsecas dos materiais de moldagem e que independem de como o molde é feito e outras que só podem ser definidas quando referidas aos moldes ou a corpos compactados. Vejamos: (MARIOTTO, 1971).

1. Plasticidade: Alteração de forma por forças externas; retenção da forma uma vez cessada a aplicação dessas forças. Esta propriedade depende das características de resistência mecânica e de deformação da areia (BROSCH, 1952).

2. Moldabilidade: A areia deve ser facilmente socável. Com pequeno esforço deve tornar-se bem compacta, tomando a forma do modelo. Esta característica afeta a economia de trabalho na confecção do molde e depende da *fluxibilidade* (escoabilidade) da areia.

3. Dureza: O molde deve resistir ao impacto e ao atrito do jato metálico, que tende a erodir sua superfície. Esta resistência superficial chama-se dureza do molde e depende da dureza e da deformação da areia de fundição (BROSCH, 1952).

4. Resistência: é a manutenção da forma da cavidade do molde quando este é submetido à solicitações mecânicas devida ao manuseio, transporte, esforços exercidos pelo metal líquido ou decorrente de sua presença (impactos, empuxo, tensões devido a dilatações térmicas, pressões de gases, etc.)

5. Escoabilidade: característica determinada pela maior ou menor facilidade de escorregamento dos grãos do material entre si, de modo a permitir perfeita reprodução dos detalhes do modelo e bom acabamento superficial do molde (MARIOTTO, 1971).

6. Consistência: medida através da resistência mecânica do material de moldagem consolidado (MARIOTTO, 1971).

A resistência mecânica (consistência) é responsável pela manutenção da forma da cavidade do molde quando este é submetido a solicitações mecânicas devidas a manuseio, transporte, esforços exercidos pelo metal líquido ou decorrente da presença de impactos, empuxos, tensões devidas às dilatações térmicas, pressão de gases, etc.

A possibilidade de se deformar antes de romper, confere ao molde a característica denominada “resiliência”, expressa pelo produto do limite de resistência à compressão pela deformação total.

As propriedades abaixo especificadas são determinantes no controle das areias de moldagem servindo de parâmetro para definir suas características, a natureza e a proporção dos seus componentes em cada processos de moldagem aplicado na obtenção de uma peça fundida.

2.4.4.1 Permeabilidade

Propriedade que deve ter os moldes de deixar passar através de si o ar, os gases e os vapores presentes ou gerados no seu interior por ocasião do vazamento do metal. Esses gases quando presos no interior do molde poderão dar origem a defeitos como bolhas, mau enchimento e outros (MARIOTTO, 1971). Durante o vazamento da peça, o ar que ocupava a cavidade do molde, bem como os gases do próprio metal e da areia, gerados durante o período de vazamento, devem escapar a fim de que a peça fundida seja completamente maciça.

A ventilação do molde está, pois, relacionada à permeabilidade da areia de fundição. Quando a areia não tem permeabilidade suficiente é comum perfurar-se muitas vezes a superfície do molde (BROSCH, 1952).

2.4.4.2 Deformação

É a possibilidade de o molde mudar de forma através da ação de esforços no manuseio, transporte, ou exercido pelo metal líquido, etc. É expressa pelo produto do limite de resistência à compressão (carga específica de rompimento) da areia de moldagem pela deformação total sofrida por esta, quando submetida a tais esforços. (MARIOTTO, 1971).

2.4.4.3 Resistência à compressão

O molde deve ter resistência para poder ser manuseado e para resistir ao peso e à pressão do metal líquido durante o vazamento. Esta resistência depende da resistência mecânica da areia de fundição.

No processo de moldagem a verde, a resistência à compressão varia com o teor de argila e a quantidade de água na mistura. Verifica-se que a quantidade de argila e o teor de umidade influenciam diretamente na permeabilidade e na resistência à compressão da areia. Observa-se, conforme ilustrado na Figura 13, que as melhores propriedades podem ser obtidas quando os teores de umidade e de argila se apresentam em porcentagens adequadas e atingem valores considerados ótimos.

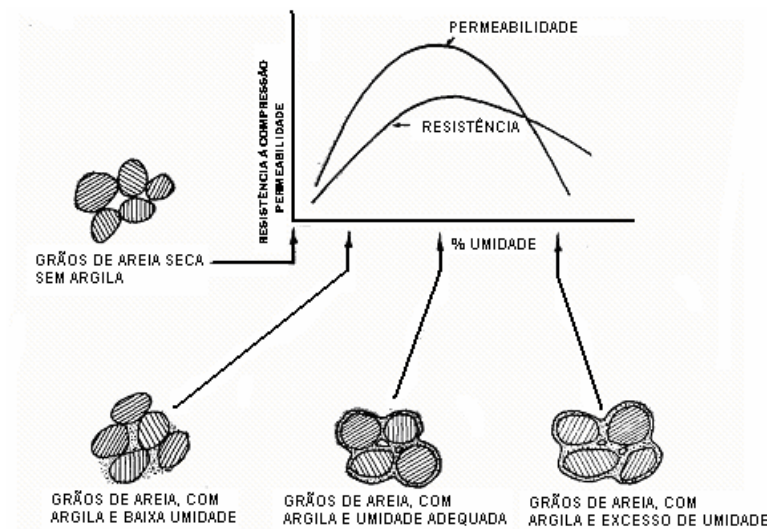


Figura 13 – Efeito do grau de umidade sobre a resistência à compressão e permeabilidade de uma areia de moldagem (GUIMARÃES; LO RÉ, 1961).

Esta propriedade depende da *resiliência* da areia de fundição que é dada pelo produto da resistência à compressão pela deformação (BROSCH, 1952).

2.4.4.4 Umidade

É uma variável determinante das propriedades de moldagem de uma areia de fundição. Quando a quantidade de água adicionada a uma areia de moldagem proporciona na prática a melhor trabalhabilidade, a umidade da mistura (areia-aglomerante) atinge o teor ótimo, chamado “umidade ótima de trabalhabilidade”, que corresponde ao ponto mínimo das curvas das Figuras 14 e 15. Nesse ponto a argila desenvolve ao máximo as suas propriedades aglomerantes, proporcionando a quase simultaneidade da melhor resistência com a maior permeabilidade do sistema. A baixa ou excessiva umidade altera as propriedades físicas-mecânicas da areia, ocasionando com isso uma série variada de defeitos na peça fundida (BROSCH; LO RÉ, 1965).

A umidade ótima de uma mistura de areia base e argila é determinada através do ensaio de “densidade solta”, onde à mistura seca areia-argila é adicionada, sucessivamente, uma quantidade discreta de água e após homogeneização em misturador,

mede-se a densidade solta desta mistura para cada adição de água. A medida é feita peneirando a mistura de modo a deixá-la cair de uma pequena altura no interior de um recipiente de volume e peso conhecidos. O peso do material contido no recipiente dividido pelo volume deste, fornece a densidade solta. Colocando num gráfico os valores assim determinados em função dos teores de umidade correspondentes, obtém-se uma curva como a da Figura 15. Verifica-se, teórica e praticamente, que o ponto mínimo dessa curva corresponde ao teor de umidade que fornece as melhores condições de trabalhabilidade à mistura, ou seja, a máxima resiliência para a quantidade de argila presente. Esse ponto é também muito próximo ao de máxima permeabilidade (MARIOTTO, 1971).

A Figura 14 ilustra as diferentes correlações entre umidade e densidade solta para quantidades variáveis de um determinado tipo de argila e a Figura 15 mostra o andamento desse tipo de curva para teores iguais de vários tipos de argila. Esta última Figura mostra que as argilas do tipo cauliníticas e micáceas apresentam notável variação no valor de densidade solta, quando o teor de umidade se afasta do ótimo, enquanto que as montmoriloníticas, mesmo para grandes variações do teor de umidade em relação ao ponto ótimo, não mostram alteração muito acentuada de densidade solta; Davies¹¹ (1950 apud Mariotto, 1971) refere-se a esse fato dizendo que as argilas cauliníticas e micáceas têm “pequeno intervalo” enquanto que as montmoriloníticas têm “grande intervalo plástico”, sendo o intervalo plástico a faixa de valores que a umidade pode assumir, ao redor do teor ótimo, sem alterar significativamente as propriedades aglomerantes da mistura. Decorre daí, que ao se usar argila de intervalo plástico extenso, os afastamentos do teor de umidade em relação ao ótimo, seja por erros de adição de água, seja por evaporação decorrente da moldagem, não são tão importante quanto no caso de se usar argila de intervalo plástico exíguo (MARIOTTO, 1971).

¹¹ Davies, W. Foundry Sand Control. United Steel Companies, Ltd. Sheffield, 1950.

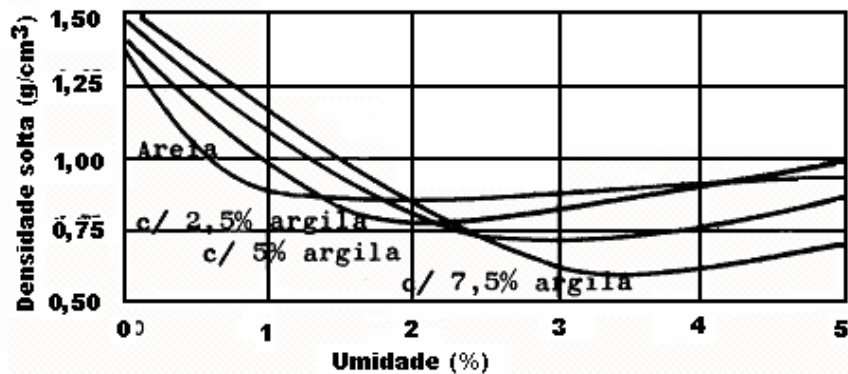


Figura 14 – Curvas de densidade solta x teor de umidade para misturas contendo quantidades variáveis de um mesmo tipo de argila (MARIOTTO, 1971).

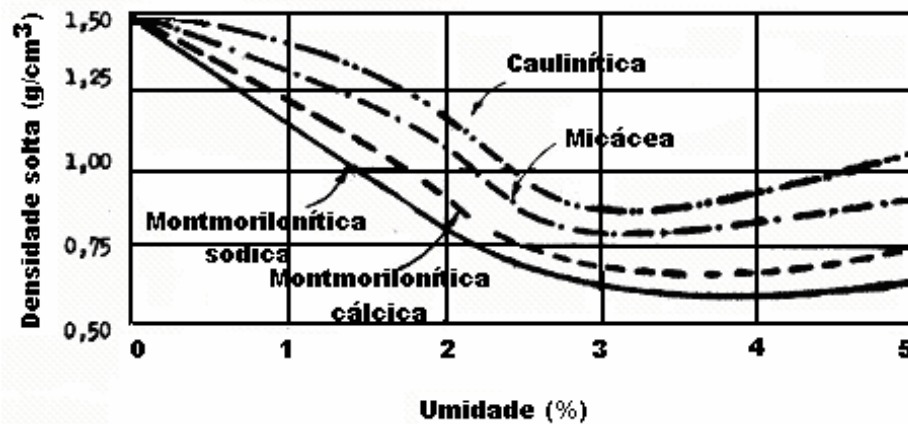


Figura 15 – Curvas de densidade solta x teor de umidade para misturas contendo teores iguais de diversos tipos de argila (MARIOTTO, 1971).

2.4.5 Características dos modelos empregados na moldagem em areia de fundição das liga de magnésio

2.4.5.1 Considerações gerais

O modelo é uma forma feita de madeira, metal ou outro material apropriado como cera poliestireno ou resina epóxi ao redor do qual o material do molde é compactado para formar a cavidade do molde. O modelo é feito de um projeto (desenho) do fundido com a adição de:

a) Tolerância de contração para compensar a contração líquida do metal no resfriamento.

b) Uma tolerância para facilitar a retirada do modelo do molde (ângulo de saída) e de partes do meio do molde.

Os modelos para alguns fundidos devem incluir, além disso, projeções denominadas marcação dos *machos*¹², para suportá-los e produzir formas, tais como cavidades internas que não podem ser moldadas diretamente do modelo.

Alguns modelos incorporam sistemas de canais de vazamento ou outros sistemas de projeção para facilitar o escoamento do metal.

Os machos de areia são feitos em caixa de machos (modelos negativos) do mesmo padrão de precisão e com os mesmos problemas de vida útil dos modelos, quando sob abrasão (METALS HANDBOOK, 1996).

Assim, os materiais empregados nos modelos para produção em ligas de magnésio fundidas em areia são similares aos que são usados na obtenção de outros metais, tais como: Alumínio, ferro, aço ou bronze. O material designado para o alumínio e muitos outros metais não ferrosos pode, em muitos casos, ser usado satisfatoriamente para o magnésio.

O modelo feito de metais ferrosos pode ser usado para produzir fundidos de magnésio quando a tolerância dimensional no acabamento do modelo compensar as deformações nas contrações entre os fundidos ferrosos e do magnésio. Vide Tabela 18.

¹² **Machos:** Núcleos de areia ou metal que servem para dar forma a partes internas e ou externas, complexa ou não de uma peça fundida.

Tabela 18 - Contração, Espessura Mínima da Seção e a Tolerância Mínima de Usinagem e Acabamento de Fundidos em Areia de vários Metais Estruturais (AMERICAN MAGNESIUM CORPORATION, 1947)

Liga Fundida em Areia	Padrão Típico de Contração da Liga (Contração) ¹ mm/m (Pol./Pés)	Padrão Típico de Contração da Liga (Contração) ¹ %	Espessura Mínima da Seção mm (Pol.)	Tolerância Mínima de Usinagem e Acabamento ³ mm (Pol)
Ligas de Magnésio	279/19,5 (11/64 ²)	1,43	4 (5/32)	4 (1/8)
Ligas de Alumínio	127/9,8 (5/32 ²)	1,30	4 (5/32)	4 (1/8)
Fer. Fund. Cinzento	25/3,0 (1/10)	0,83	4 (1/8)	4,8 (3/16)
Fer. Fund. Maleável	25/2,4 (1/8)	1,04	4 (5/32)	4,8 (3/16)
Aço	25/1,2 (1/4)	2,08	4,8 (3/16)	7,9 (5/16)
Bronze	76/4,9 (3/16)	1,56	2,4 (3/32)	4 (5/32)

¹ A tolerância de contração para ligas fundidas varia de acordo com o tipo de processo de obtenção, dimensão do fundido e outros fatores peculiares que envolvem, em particular, o metal. Se a manutenção da dimensão requerida é exata, a fundição na qual o fundido é produzido deve ser consultada quanto às recomendações da tolerância de contração, antes da fabricação do modelo.

² Para pequenos fundidos de projeto simples. Para fundidos de tamanho grande ou projetos complexos, a contração varia de 3,18mm a 2,11mm (1/8 a 1/12 pol).

³ Valores médios aplicados a partes de dois a três pés de comprimento.

Para produzir fundidos de magnésio a areia de fundição deve apresentar condições de moldagem para permitir projetar modelos em partes, ou, dentro do razoável, alterar o modelo existente para atender o método de moldagem especial de fundição (AMERICAN MAGNESIUM CORPORATION, 1947).

A contração das ligas de magnésio varia, dependendo de um número de fatores, de 0,8 a 1,8%. O valor da contração típica para pequenos fundidos de magnésio em areia, sem macho, e de desenho simples é de 1,3 a 1,45%. Para fundidos de areia de grande dimensão ou formato complicado, a contração pode variar entre 0,8 e 1,05%, dependendo do tipo de processo de fundição e posição dos machos. Os machos de areia quando usados em moldes de areia e em moldes semipermanentes devem ser de espessura suficiente para facilitar o manuseio sem quebra excessiva. Partes salientes e

agudamente projetadas, se possível, devem ser eliminadas, caso quebrem facilmente ou entrem em erosão (AMERICAN MAGNESIUM CORPORATION, 1947).

Como o magnésio fundido solidifica rapidamente no molde devido à baixa capacidade calorífica, por esse motivo a espessura do fundido deve ser adequada ao projeto. Para pequenas áreas e empregando modelos metálicos a espessura do fundido pode ser reduzida até três mm.

A tabela 19 mostra outra espessura da seção mínima recomendada para o alumínio, magnésio e aços fundidos a serem obtidas por alguns processos de fundição.

Tabela 19 – Espessura mínima de seção, mm (NORSK HIDRO, 1971).

Processo	Alumínio	Magnésio	Aços Fundidos
Fundição em Areia	3,0 – 3,9	3,2 – 4,7	4,0 – 5,5
Matriz por gravidade	3,0 – 4,0	3,0 – 4,0	---
Fundição de Precisão	1,0 – 1,5	1,0 – 1,5	2,0 – 2,0

Para o magnésio o material do modelo pode ser madeira, metal ou plástico. Para fundidos de magnésio, o ângulo normal de saída dos modelos de madeira é de 1,5° a 2° (NORSK HIDRO, 1971).

2.4.5.2 Materiais empregados na modelagem

Os materiais dos quais são feitos os modelos diferem grandemente nas suas características e, portanto, nas aplicações às quais eles melhor se adaptam (METALS HANDBOOK,1996). A decisão quanto ao material a ser usado para um modelo específico depende de vários fatores, sendo que os mais importantes se relacionam com:

a) A peça – O modelo tem uma influência preponderante na obtenção de determinadas características funcionais das peças.

Torna-se necessário, na escolha do material para sua construção, considerar o máximo de dados sobre a peça, como sejam: emprego, metal, forma, volume dimensões, número e velocidade de produção.

b) As características dos materiais: Quanto ao material empregado na construção do modelo, é muito importante que suas características, dadas a seguir, sejam as melhores possíveis, Resistência mecânica, resistência ao desgaste, resistência à corrosão e à deformação, peso, custo, usinagem, possibilidade de reparo e custo de construção do modelo.

Não existe, na prática, um material reunindo todas as características citadas, então é aconselhável escolher-se aquele que, numa determinada fabricação, apresente melhores condições técnicas e econômicas.

c) O processo de moldagem a ser usado na fundição: O material empregado na construção do modelo depende dos processos de moldagem, manuais ou mecânicos.

Muitas vezes é necessário que os modelos sejam feitos de uma combinação de materiais, tais como: madeira com enxertos plásticos sobre a superfície usada, madeira com enxerto de metal ou liga de alumínio com aço enxertado.

Outros fatores como a quantidade de produção estimada, a tolerância dimensional requerida, e o tamanho e a forma da peça podem ser considerados como fatores importantes.

Os materiais mais usados na construção de modelos são os seguintes (BARÃO, 1980):

1- Madeira – É o material de emprego mais generalizado, nas seguintes circunstâncias:

a) Na produção de um número reduzido de peças fundidas, tendo formas e tamanhos muito variáveis. A baixa resistência ao desgaste da madeira limita o número de moldes produzidos por modelo, uma vez que estes perdem continuamente sua precisão dimensional, devido à ação da areia durante a moldagem.

b) Na obtenção do modelo mestre, usado na construção de modelo, onde são fundidos modelos metálicos empregados na moldagem manual, ou placas modelo, para moldagem mecânica ou moldagem em casca.

A madeira tem boas características, como seja, facilidade de usinagem, alta resistência à corrosão, baixo custo e peso reduzido. Permite o reparo do modelo em caso de quebra, mas desgasta-se rapidamente devido ao atrito com os grãos de areia

durante o socamento e absorve ou perde umidade do ar, o que pode alterar suas dimensões. Este último inconveniente tem sido controlado pela secagem da madeira em estufa, antes da construção do molde e impermeabilização deste por meio de pintura.

2 - Metais – Os modelos metálicos são usados na produção de grandes quantidades de peças. Comparados com os modelos de madeira apresentam as seguintes vantagens: maior resistência ao desgaste e, portanto consistência das dimensões, durante um período longo de trabalho de moldagem; acabamento superficial mais aprimorado, o que facilita sua retirada da cavidade de molde, embora seu custo seja maior.

Metais comumente empregado na construção de modelos

2.1 – Alumínio – A maioria dos modelos metálicos é construída em alumínio, por suas características favoráveis, como sejam: temperatura de fusão e densidade baixas, facilidade de usinagem, resistência à corrosão, ao desgaste e mecânica apreciáveis.

2.2 – Bronze – Devido à alta densidade da liga, seu emprego é mais comum e modelos para produção elevada de peças pequenas. O polimento superficial e a resistência ao desgaste são superiores aos do alumínio. O bronze é facilmente soldável, o que permite o reparo do modelo. A maior desvantagem, em relação ao alumínio é o seu custo mais elevado.

3 – Plásticos – Estes materiais são usados em modelos para moldagem em areia e processo de fundição de precisão ou investimento.

3.1 – Epóxi – Os metais têm sido substituídos em muitos casos, pelas resinas do tipo epóxi, na fabricação de modelos, dadas as características de emprego favoráveis, no trabalho de moldagem. Assim quando comparadas com metais (ou madeiras), apresentam as seguintes vantagens:

- Maior resistência à corrosão de substância química.
- Maior resistência ao desgaste, provocado pelo impacto ou socamento da areia.

- Contração de solidificação praticamente nula (o que dispensa a dupla contração de solidificação usada no modelo para construção da matriz).

- Facilidade de reprodução, uma vez que o modelo é obtido através do vazamento e solidificação do plástico em matrizes de madeira ou metal, o que dispensa trabalho do acabamento superficial.

- Grande período de duração do modelo, com variações dimensionais insignificantes, o que permite seu uso nas grandes produções de peças (BARÃO, 1980).

2.5 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DOS MOLDES EM AREIA NA FUNDIÇÃO DO MAGNÉSIO E SUAS LIGAS

2.5.1 Considerações gerais

Dentre os fatores mais importantes que influenciam a qualidade dos fundidos do magnésio em areia estão os canais de alimentação e os alimentadores. O sistema de canais que conduz o metal para a cavidade do molde e sua distribuição determinará se o fundido será livre de inclusão de escória. Os alimentadores ou sistema de alimentação determinam se o fundido estará livre de defeitos de contração (AFS, 1965).

Desse modo, a produção de bons fundidos depende muito do sistema de canais de alimentação e de alimentadores apropriados. O sistema de canais é projetado para que se obtenha a máxima circulação do metal fundido e para evitar a turbulência na cavidade do molde. A agitação causa retenção de escória na superfície do líquido, podendo ser evitada com o uso de canais com ranhuras. Ângulos agudos e ranhuras profundas dos canais de vazamento permitem o metal entrar na cavidade do molde com o mínimo de agitação. As seções transversais dos canais devem ser, de preferência, retangulares às quadradas ou redondas, sendo ligadas ao fundido, exceto quando são partes do sistema de alimentação. A preferência por canais de seções finas e retangulares favorece o resfriamento rápido e, por conseguinte, produz canais perfeitos (NORSK HIDRO, 1971). Os alimentadores devem ser suficientemente altos para

proporcionar pressão metalostática e auxiliar na retenção da escória, gás, etc., que surge no metal líquido (WOLDMAN, 1946).

2.5.2 Sistemas de canais de alimentação, alimentadores e resfriadores empregados na moldagem

2.5.2.1 Sistema de canais de alimentação

É importante quando os canais de alimentação dos fundidos de magnésio enchem a cavidade do molde rapidamente e completamente. O magnésio tem baixa capacidade calorífica por unidade de volume – 160 Cal/cm^3 comparado com o alumínio 260 Cal/cm^3 . O magnésio solidifica rapidamente e por essa razão o sistema de alimentação dos moldes deve ser mais volumoso do que o aplicado para o alumínio. A velocidade dos sistemas de alimentação utilizados para peças de magnésio de paredes finas devem ser altas, atingindo até 120 m/s (HU ET AL, 2000).

Quando o fundido de magnésio se encontra distante do sistema de alimentação é mais importante alimentar rapidamente com metal fundido do que tentar obter uma elevada pressão de fundição. Um exemplo é aumentar um pouco a altura do canal de decida a fim de obter elevada pressão de fundição antes do metal preencher a cavidade do molde e solidificar (NORSK HIDRO, 1971).

Para prevenir a entrada do metal de forma abrupta na cavidade do molde através dos canais, deve-se evitar o estrangulamento do sistema de canais nesse ponto. A prática mais comum é fazer o canal de descida com uma seção transversal relativamente pequena de modo que ela se comporte como um estrangulamento nos sistemas de canais. A área da seção transversal do canal de distribuição é feita com o dobro da área do canal de descida, e o total do canal de entrada deve ser no mínimo igual a dos canais de distribuição. A exemplo, a relação $1 : 2 : 2$ (AFS, 1965). A Figura 16 mostra outra relação entre sistemas de canais de alimentação, admissível para fundição do magnésio e suas ligas, onde a relação entre as seções do canal de decida, canal de distribuição e do canal de entrada é $1 : 4 : 4$ (A: B: C:).

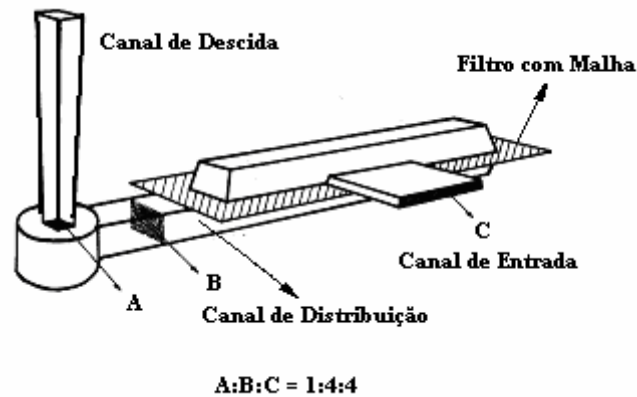


Figura 16 – Sistema de canais de alimentação (NORSK HIDRO, 1971).

Para evitar a formação de bolhas de ar e películas de óxido no fundido deve ser evitado que a cavidade do molde seja preenchida por cima, isto é a alimentação do molde diretamente do canal de descida.

O canal de entrada deve conduzir o metal para dentro da cavidade do molde pelo ponto mais baixo. O metal nunca deve cair na cavidade do molde de um nível mais alto para um mais baixo, visto que isso aumentará a turbulência e causará a mistura do metal com escória e óxidos (sujeiras). Deverá ser permitido o metal escoar uniformemente para a cavidade do molde. A maior parte da escória e drosses (óxido mais escória) pode ser removida para que o metal escoe internamente através do canal de entrada. As impurezas aderem a parede dos canais de distribuição.

O canal de descida pode ser projetado como mostram as Figuras nº 17 a e 17b. Ele necessita freqüentemente de considerável redução da velocidade para escoar o metal, por isso deve ser projetado com canais paralelos e nivelados com espessura de aproximadamente 5 mm (3/16”) a 8 mm (5/16”).

Isto torna fácil manter a bacia de vazamento cheia, de modo que a escória e os óxidos não acompanhem o metal para dentro da cavidade do molde.

Os canais devem ser providos de um filtro com malha de aproximadamente 2 mm como mostram as Figuras 16 e 17 b. Os filtros coletam a escória e as impurezas que poderia entrar na cavidade do molde.

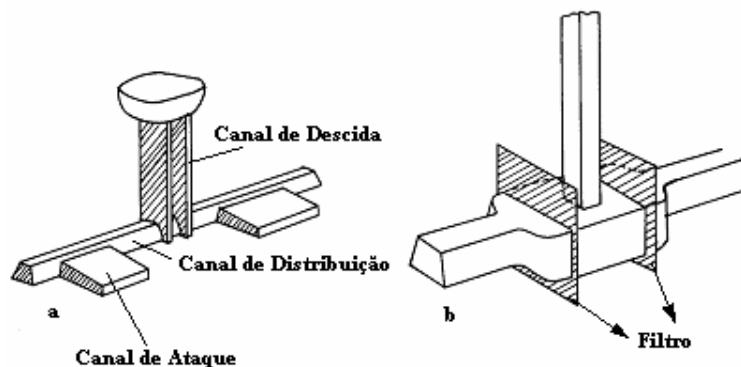


Figura 17 – Canal de descida – (NORSK HIDRO, 1971).

Os canais de entrada podem ser projetados como mostram as Figuras 16 e 17.

Vários canais de entrada, como mostra a Figura 17a, são recomendados para permitir que a cavidade do molde seja alimentada de vários pontos. Utilizam-se ranhuras se somente um canal de entrada for empregado. Quando o metal fundido escoar para a cavidade do molde, se solidifica rapidamente nas paredes deixando certas ranhuras na passagem. Estas ranhuras são inconvenientes e bloqueadoras da solidificação unidirecional.

Visto que a cavidade do molde é preenchida de metal quente alimentado pelo canal de descida, o mesmo flui horizontalmente, no mesmo nível, para dentro do molde. Os canais de descida devem ser suficientemente dimensionados para compensar a contração de solidificação. O canal de descida deve ser localizado na parte mais espessa do fundido. Se necessário, o canal de descida pode ser estendido e ligado a um alimentador. Os alimentadores podem ser localizados sobre ou ao lado da seção a ser alimentada. Enquanto o metal solidifica, as seções pesadas do fundido como reentrâncias e flanges são alimentadas com o metal quente do alimentador que não se solidifica antes do fundido.

Durante o vazamento do magnésio é importante que os alimentadores possam fornecer metal quente ao molde. O alimentador é cheio com metal quente através de um canal vertical. Um outro método é o uso de duas painéis e o vazamento se completa quando o metal do alimentador chega ao topo.

Para controlar a solidificação em várias seções do fundido os resfriadores são posicionados nas superfícies de contato do molde de areia. Enquanto o metal solidifica

estas seções se auto-alimentam pela retirada de metal da parede adjacente. Estas paredes devem ser alimentadas por outras seções ao redor. Este método é chamado freqüentemente de solidificação direcional (NORSK HIDRO, 1971).

Considerando que as ligas de magnésio fundidas oxidam rapidamente, as técnicas do sistema de alimentação ou métodos de enchimento do molde são de grande importância. A turbulência do escoamento leva à formação de películas superficiais e filmes de óxidos conduzidos pela corrente do metal em escoamento que aparecem como inclusão ou uma camada localizada na superfície do metal.

Para prevenir estas *drosses*¹³ que são levadas para a cavidade do molde deve ser aplicada uma técnica própria no sistema de canais de alimentação. Dois caminhos são possíveis para a solução do problema. O primeiro é suprimir a turbulência do sistema de alimentação e desse modo prevenir a formação de óxido. O segundo é permitir uma certa turbulência em partes do sistema de alimentação, aceitar a formação de alguns óxidos e separá-los da corrente do metal em escoamento, antes que escoem para a cavidade do molde (AFS, 1965).

2.5.2.2 Alimentadores

Os alimentadores são necessários para compensar as cavidades de contração do metal líquido que solidifica no molde. Os alimentadores são reservatórios de metal líquido que proporcionam uma alimentação extra no fundido de forma a prevenir a formação de cavidades decorrentes da contração.

O alimentador para ser efetivo deve ser a última parte do fundido a solidificar. Desse modo, para que os alimentadores solidifiquem por último, é necessário que se tenha um gradiente térmico favorável no fundido. É necessário que o ponto ou os pontos mais distantes solidifiquem primeiro e que exista um gradiente contínuo de temperatura desse ponto até o alimentador. Se o gradiente não for contínuo, ou se for pequeno, ocorrerão defeitos de contração (AFS, 1965).

¹³ Drosses – Óxidos insolúveis decorrente da reação do metal com o oxigênio.

Para atingir esse gradiente térmico desejável é necessário atentar para cinco fatores importantes:

2.5.2.2.1 Alimentador de menor massa

Se a função do alimentador é se manter funcionando como um reservatório de metal líquido até que a peça tenha se solidificado, ele não pode resfriar antes de cumprir a sua função. A maneira mais comum de assegurar que ele se mantenha líquido é fazê-lo mais volumoso do que a seção transversal da peça que esteja sendo alimentada.

A isolação de alimentadores com materiais tais como: gesso, asbesto, ou materiais exotérmico tem sido empregado para permitir alimentadores menores, com menor massa e assim melhorar o rendimento do fundido (AFS, 1965).

2.5.2.2.2 Espaçamento dos alimentadores

Para cada liga existe um espaçamento ótimo dos alimentadores baseado na distância máxima de alimentação. Para as ligas de Magnésio não foi estabelecida uma determinação precisa de alimentação, sendo que várias dessas ligas têm um comportamento bem diferente.

Quando o projeto da peça apresenta uma seção pesada ligada a uma parede fina, é desejável que a alimentação da seção seja feita diretamente por um alimentador. Quando duas ou mais seções pesadas a serem alimentadas estiverem próximas alguns problemas de alimentação podem ocorrer. Se ambas seções são alimentadas, uma área densamente porosa pode aparecer na parede fina que separa as duas seções. Algumas vezes esta dificuldade pode ser resolvida pela alimentação de uma e o resfriamento da outra se a diferença de temperatura entre a seção pesada e a fina não for extrema (AFS, 1965).

2.5.2.2.3 Junção do alimentador

Uma consideração importante a ser evidenciada na alimentação de uma peça é o ponto de junção desta com o alimentador que, via de regra, é a região mais

problemática, quanto a porosidade. Este fato é devido ao baixo gradiente térmico na região da junção.

É difícil colocar um alimentador de topo sobre uma peça na forma de uma placa horizontal sem criar um problema de alimentação na junção, especialmente em alguns tipos de liga (AFS, 1965).

O uso de alimentadores laterais evita este tipo de problema por poder ter massa suficiente para se manter fundido até que a peça tenha se solidificado completamente, além de permitir um fundido mais forte com estrutura de grãos mais finos.

As Figuras 18 e 19 ilustram esse princípio. A Figura 18 mostra uma junção mal projetada associada a alta porosidade na área inscrita pelo círculo pontilhado. A Figura 19 mostra uma melhoria adequada ao projeto de alimentação favorável a certas ligas.

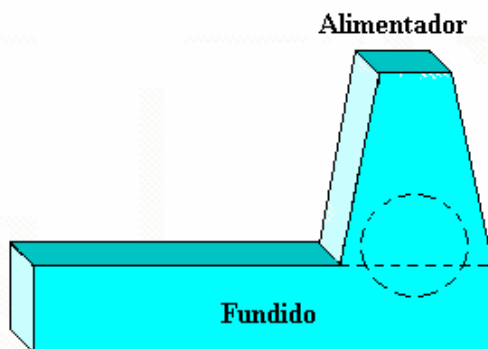


Figura 18 – Junção inadequada do sistema alimentador-peça (AFS, 1965).

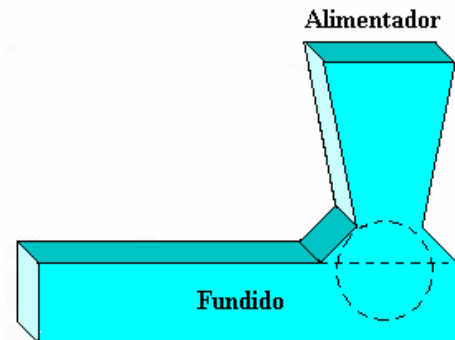


Figura 19 – Junção adequada do sistema alimentador-peça. (AFS, 1965).

2.5.2.2.4 Fluxo padrão no enchimento de moldes

Geralmente, o alimentador é mais volumoso do que a seção que ele alimenta e, algumas vezes, luvas exotérmicas são usadas para garantir a permanência do metal líquido por mais tempo na peça que está sendo alimentada. Outro fator importante que pode influenciar a taxa de resfriamento do alimentador é o fluxo do metal ao preencher a cavidade do molde. Se a finalidade é obter um resfriamento rápido de uma seção do fundido, deve-se evitar o fluxo excessivo de metal naquela parte do molde durante o enchimento do fundido.

Por outro lado, quando se deseja que o resfriamento seja lento, aumenta-se o fluxo nesta parte do molde.

Uma técnica valiosa no controle do fluxo nos fundidos de magnésio tem sido o uso de telas em paredes verticais como ilustrado na Figura 20. Quando usada desta maneira, a tela tubular serve não apenas para a filtragem de óxidos, mas também para promover o enchimento dos alimentadores do topo diretamente do sistema de alimentação pelo escoamento do metal através da cavidade do fundido (AFS, 1965).

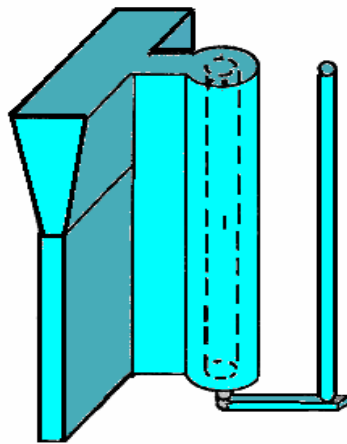


Figura 20 - Uso de tela tubular para controle de enchimento do molde (AFS, 1965).

2.5.2.2.5 Resfriadores

Uma ferramenta importante para o controle das condições térmicas na peça em solidificação é a utilização de resfriadores. São peças simples de metal fixadas no molde para retirar calor de uma seção localizada no fundido, proporcionando seu rápido resfriamento.

Notadamente o uso mais freqüente dos resfriadores é de acelerar o resfriamento de seções grandes que não são alimentadas diretamente. Em alguns casos é conveniente, ou impraticável, alimentar diretamente em um dado fundido toda e cada seção grande rodeada por paredes finas. Nestes casos, uma ferramenta considerável é o uso de resfriadores para acelerar a solidificação de uma seção grande, não alimentada diretamente, que poderá ser suprida com metal fundido das paredes finas adjacentes que ainda não solidificaram.

Uma outra aplicação dos resfriadores é aumentar os gradientes térmicos do alimentador até pontos distantes do fundido. Sabe-se que é necessário um gradiente térmico mínimo para a alimentação da peça e que o resfriamento pode aumentar a diferença do gradiente térmico que ocorre durante a solidificação.

Por fim, os resfriadores podem proporcionar uma taxa de solidificação mais rápida, e como resultado uma estrutura mais fina, que possa apresentar de forma eficiente no tratamento térmico melhoria nas propriedades mecânicas do fundido (AFS, 1965).

Os resfriadores de ferro fundido usados para fundidos de magnésio podem ser riscados ou respirados para garantir que o metal acomode uniformemente na parede do resfriador. Eles são normalmente revestidos com talco misturado com ácido bórico ou bentonita como agente ligante e secados em fornos de secagem de macho ou durante o aquecimento com maçarico do molde antes de fundir. Uma base de álcool ou parafina facilita a secagem do revestimento do resfriador. Os resfriadores são muitas vezes modelados para servir à área que está sendo resfriada, a espessura é ajustada para adaptar à parede do fundido. Eles são colocados, portanto, como ajuda no estabelecimento do gradiente de temperatura desejada para solidificação direcional. É necessária uma limpeza periódica, a jato ou escovação, para manter o efeito do resfriamento desejado (EMLEY, 1966).

2.6 TECNOLOGIA DE FUSÃO APLICADA ÀS LIGAS A BASE DE MAGNÉSIO

2.6.1 Equipamentos e acessórios usados nas operações de fundição.

2.6.1.1 Fornos e outros equipamentos de fundição

Fornos usados para a fusão de ligas de magnésio em geral são semelhantes aos usados para fusão de ligas de zinco e alumínio. Por outro lado, a natureza do magnésio requer diferenças no equipamento, no refratário e proteção das superfícies:

1. Os cadinhos podem ser feitos de aço forjado ou fundido, porque o magnésio fundido não ataca metais ferrosos (METALS HANDBOOK, 1996).
2. Os refratários devem ser selecionados cuidadosamente, pois o magnésio fundido reage violentamente com alguns refratários. Refratários de alta alumina e tijolos refratários de alta densidade, com 57% de sílica e 43% de alumina oferecem bons resultados (MAGNESIUM ELEKTRON, 1977).
3. Devido o magnésio fundido reagir explosivamente com óxidos ferrosos, deve ser providenciada uma porta de limpeza para remoção das carepas que caem do cadinho ou do próprio forno, e um reservatório deve estar abaixo do cadinho para reter o metal fundido, em caso de falha do cadinho.
4. Um fluxo protetor ou um gás protetor deve cobrir o magnésio fundido para prevenir a queima. Quando é usado o dióxido de enxofre forma-se uma cortina protetora sobre a superfície do banho protegendo-o contra o oxigênio. Deve ser providenciada uma ventilação adequada para a retirada dos fumos (METALS HANDBOOK, 1996).

2.6.1.2 Fornos

Independentemente do processo, fornos estacionários, ou de cadinho basculante, aquecidos por gás ou óleo ou fornos a indução são comuns para fundição. Para uma pequena operação, fornos estacionários operados a combustíveis e de cadinho aberto são normalmente utilizados, como mostra a Figura 21. Para a fundição de grandes

quantidades de metal fornos de cadinho basculante são preferidos, pois são mais eficientes para a transferência do metal e mais facilmente limpos. Fornos de indução sem núcleo são mais econômicos os que fornos de cadinho para grandes operações. Algumas vezes as ligas de magnésio são fundidas em pré-fornos, em quantidade acima de 450 kg, e então são transferidas por vazamento ou bombeamento para fornos de espera menores com cadinhos removíveis, onde o fundido é tratado e vazado para no molde (METALS HANDBOOK, 1996).

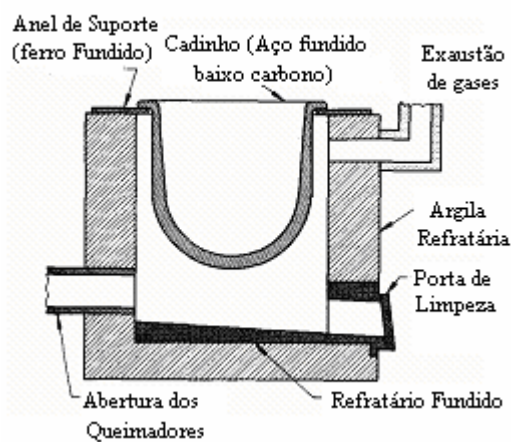


Figura 21 - Forno a óleo, estacionário, para fusão de ligas de magnésio em cadinho aberto (AVEDESIAN; BAKER, 1999).

2.6.1.3 Cadinho

Com capacidade variando de 30 kg até 500 kg de metal fundido. Alguns cadinhos são feitos de um conjunto soldado de aço baixo carbono, entretanto cadinhos de paredes inteiras de aço são preferidos quando a capacidade ultrapassa 150 kg. Aços com baixos teores de carbono (preferencialmente abaixo de 0,12%) e com níquel e cobre menores do que 0,10%, cada, são os mais recomendados, como mostra a Figura 22. Cadinhos de aço usados para fundir ligas de magnésio normalmente falham pela formação de carepa do lado externo ou por distorção causada pela carga e temperatura. Os cadinhos devem ser inspecionados periodicamente para assegurar que não tenham sido formadas paredes finas, pois falhas de cadinho podem causar incêndio. A presença excessiva de escória no fundo do cadinho diminui a vida útil. A condutividade térmica da escória por ser comparativamente menor causa um

superaquecimento das paredes do cadinho e formação de carepa. O ataque da chama no cadinho também causa a formação excessiva de carepa (NORSK HIDRO, 1968).

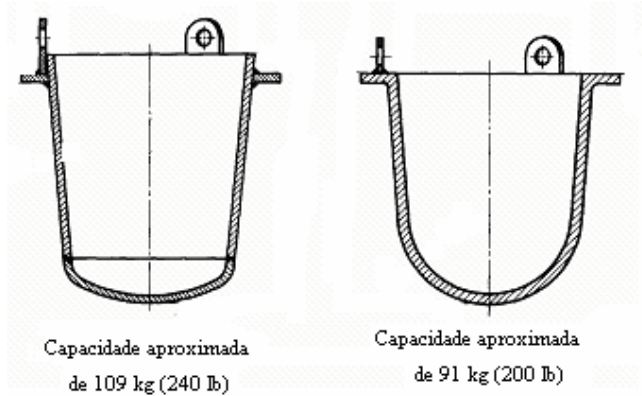


Figura 22 - Cadinhos de aço para magnésio (NORSK HIDRO, 1968).

2.6.1.4 Painelas de vazamento

Devem ser construídas de aço baixo carbono semelhante ao dos cadinhos. As painelas são normalmente feitas de aço baixo carbono, como mostra a Figura 23. O projeto deve incluir uma proteção contra o fluxo excessivo e uma bica no fundo para o vazamento do metal sem contaminação do banho. O tamanho da panela depende do peso do fundido a ser obtido (METALS HANDBOOK, 1996).

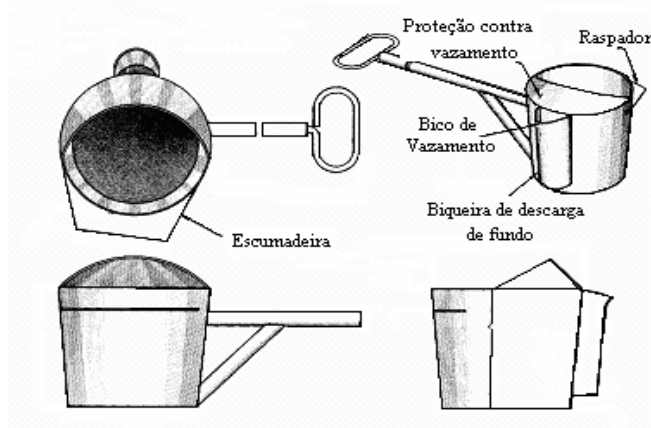


Figura 23 - Detalhes de construção de painelas usadas no vazamento de ligas de magnésio

2.6.1.5 Painelas para transferência e conchas para remoção de escória

As painelas de transferência são usualmente soldadas em aço baixo carbono. Suas laterais devem o formato cônico e os cantos arredondados para facilitar a limpeza

na superfície do banho durante retirada do metal. As panelas devem ter suas dimensões relativas ao tamanho do cadinho e uma capacidade que varia de 2 kg a 10 kg (NORSK HIDRO, 1971).

As conchas são vasos semi-esféricos soldados em alças de aço de comprimento adequado. A base curva das conchas tem de 15 cm a 30 cm de diâmetro, dependendo do tamanho do cadinho. Estas devem ser construídas de material de aço baixo carbono e baixo níquel (METALS HANDBOOK, 1996).

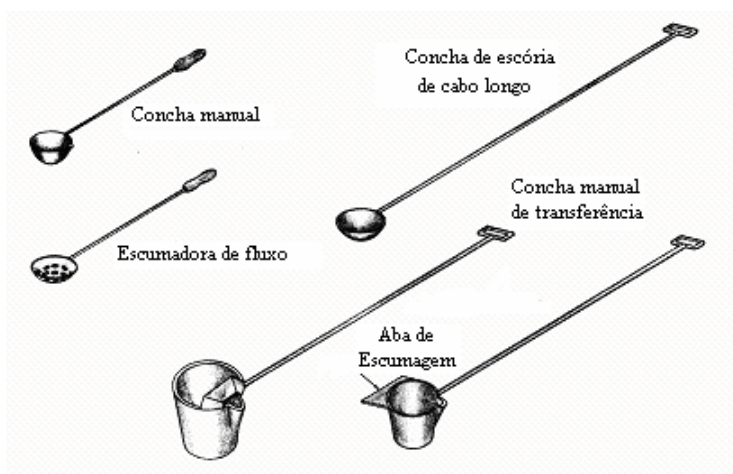


Figura 24 - Panelas e conchas manuais para transferência de magnésio fundido

2.6.1.6 Medidores de temperaturas (Pirômetros)

As medições de temperatura são feitas com equipamentos compostos de mostradores analógicos ou digitais ligados a sensores do tipo termopares de ferro-constantan (até 980 °C) ou de cromel-alumel (até 1315 °C). Eles devem ser instalados permanentemente no banho para o acompanhamento da temperatura durante o ciclo do processo. Alguns medidores portáteis são usados para levantar dados durante o processo de fusão controlando a temperatura do banho desde o início da fusão até o vazamento. Os termopares devem ser regularmente calibrados e a melhor forma de fazer é mergulhá-los em um banho de metal fundido, por exemplo em alumínio puro que funde a 659 °C ou em zinco puro, que funde a 419 °C (NORSK HIDRO, 1968). A proteção dos termopares deve ser feita com tubos de ferro forjado, aço laminado ou aço inoxidável isento de níquel (METALS HANDBOOK, 1996).



Figura 25 – Medidor digital de temperatura do banho metálico

2.6.1.7 Fluxos

Os fluxos usados durante a fusão das ligas de magnésio contêm cloreto de magnésio como maior constituinte. Eles são higroscópicos e devem ser estocados em recipientes com tampas metálicas. O fluxo é um agente protetor usado para prevenir a queima do metal fundido na panela. Fluxos e agentes protetores são materiais patenteados (METALS HANDBOOK, 1996).

2.6.2 Técnica de fusão e refino

Somente metal limpo deve ser carregado nos fornos de fusão. Metal contendo impurezas introduz gás e contamina o banho. O metal deve ser mantido livre de umidade e óleo. Toda a sucata deve ser previamente limpa por jateamento abrasivo porque a aderência de areia na sucata fundida causa a contaminação pelo silício. Canais e massalotes devem ser refundidos o mais breve possível depois de removidos das peças (METALS HANDBOOK, 1996).

2.6.2.1 Fusão

Uma quantidade de fluxo igual 1,5% da capacidade do cadinho deve ser colocada no fundo do cadinho vazio. Sucata seca ou lingotes secos são então adicionados.

O metal deve ser colocado de modo que ele não crie uma cobertura no banho “bridge over” durante a fusão. A carga é aquecida com o fluxo necessário para prevenir a oxidação do magnésio fundido. Metal sólido é adicionado à carga com metal semi-líquido até que o cadinho esteja cheio (METALS HANDBOOK, 1996).

2.6.2.2 Limpeza do metal fundido

O magnésio líquido oxida rapidamente em presença de atmosfera contendo oxigênio. Durante a fusão e o manuseio do metal líquido é necessário proteger o fundido da oxidação extensiva pelo uso de uma atmosfera protetora de hexafluoreto de enxofre (PETTERSEN, 2002). A limpeza do banho tem início a uma temperatura entre 704,4 °C e 715,6 °C (1300 °F até 1325 °F), quando o metal fundido é submetido uma vigorosa e cuidadosa agitação “*stirring*” manual com movimento circular uniforme, sob constante adição de fluxo até 1,5% da carga, que é espalhado em pequenas quantidades sobre a superfície do banho até completa decantação. Após a operação o banho é deixado em repouso por 10 a 15 min para precipitação total das impurezas não metálicas e partículas de fluxo no fundo do cadinho (METALS HANDBOOK, 1996).

Nas fusões com cadinho aberto as painéis de vazamento podem ser usadas como boa indicação para limpeza metal. Os gases e outras impurezas não metálicas podem ser removidos por cloração (borbulhando cloro através do metal fundido). O cloro é introduzido no metal através de um tubo de grafite. O cloreto de magnésio formado durante a cloração funde acima de 708,3 °C (1.307 °F) e remove partículas de óxidos e outras impurezas suspensas. A faixa de temperatura ótima para cloração é de 718,3 °C a 760 °C (1325 °F a 1400 °F) e a duração do tratamento é usualmente entre 5 e 15 min (METALS HANDBOOK, 1996).

2.6.2.3 Refino de grão

O tamanho de grão das ligas do magnésio, sem refino, é aproximadamente 300~500 µm. As amostras tratadas possuem aproximadamente 150~200 µm e melhores propriedades mecânicas (OGAWA; IMAI; TOYODA, 2005).

Os dois métodos mais usados para refinar grão são o superaquecimento e a inoculação com carbono.

No superaquecimento, o metal é aquecido a 898,9 °C até 926,7 °C (1650 °F até 1700 °F) e mantido por cerca de 15 min. Ele é então resfriado rapidamente para a temperatura de vazamento pela remoção do cadinho do forno. Melhores resultados são obtidos se o metal é resfriado lentamente da temperatura de superaquecimento (METALS HANDBOOK, 1996).

Diferentes tipos de refinamentos de grão à base de carbono continuam sendo desenvolvidos até o momento e vários agentes contendo carbono tais como o C_2Cl_6 , CCl_4 , CaC_2 e grafite granular têm sido testados no refino de grãos de ligas de magnésio (JIN ET AL, 2003).

A inoculação com carbono geralmente é feita com adição de compostos orgânicos como o hexacloretano ou hexaclorobenzeno. A prática geral é utilizar entre 28 a 30 g para cada 45 kg de metal em gaiolas fechadas para refino de grão, conforme é mostrado na Figura 26 (METALS HANDBOOK, 1996).



Figura 26 – Equipamento usado no refino do grão de magnésio

As pastilhas do composto são colocadas no banho e mantidas submersas até a sua decomposição. Para o tratamento efetivo o metal deve estar entre 760 °C e 815,6 °C (1400 °F e 1500 °F). Após a reação ser completada a temperatura do banho deve ser mantida acima de 760 °C (1400 °F). O cloro liberado do composto orgânico refinador de grão tem o efeito desgaseificante. Então, ambos, refino de grão e desgaseificação são realizados neste tratamento.

O carboneto cálcio é algumas vezes usado para refinar o grão, mas só é efetivo se o tratamento é feito à cerca de 760 °C (1400 °F) e o metal for mantido acima daquela temperatura durante o vazamento. Após a lama ser removida do cadinho, a temperatura é elevada de 760 °C a 787,8 °C (1400 °F a 1450 °F) e o carboneto de cálcio em pelotas de pequeno tamanho é espalhado sobre a superfície do banho e o é metal vigorosamente agitado. A quantidade de carboneto de cálcio usada é cerca de 1% do peso do metal no cadinho. Por causa da decomposição do carboneto de cálcio pela umidade, ele deve ser mantido em um recipiente hermético e as adições ao metal fundido devem ser feitas cuidadosamente para evitar uma reação explosiva como o metal. O metal deve ser retratado a cada 3 a 4 horas e após cada tratamento a lama residual deve ser retirada do cadinho (METALS HANDBOOK, 1996).

2.6.2.4 Carregamento das panelas

Limpas e pré-aquecidas as panelas de vazamento, mostradas na Figura 23, são usadas para imersão no metal em cadinhos abertos. Dependendo da liga e do tipo de peça a ser vazada a temperatura no momento da imersão deverá estar entre 704,4 °C a 843,3 °C (1300 °F a 1550 °F). Se a temperatura for mais alta que 787,8 °C (1450 °F) é difícil mergulhá-la e deixá-la livre de fluxos e óxidos.

É recomendado que seja mantido um recipiente com fluxo especial para garantir a limpeza das ferramentas e panelas. Um fluxo com propriedades de baixo ponto de fusão, mantido na temperatura de 648,9 °C a 704,4 °C (1200 °F até 1300 °F), para dissolver partículas não metálicas das ferramentas e mantê-las aquecidas. O excesso de fluxo deve ser drenado da panela, que ao ser cheia com metal, permite o escoamento do fluxo através da bica de vazamento. A panela com metal é então esvaziada reenchida e esvaziada. Esse procedimento promove a remoção do fluxo no interior da panela, que fica pronta para imersão no banho e posterior vazamento no molde (METALS HANDBOOK, 1996).

2.7 OPERAÇÃO DE VAZAMENTO

2.7.1 Métodos e técnicas de vazamento

Na operação de vazamento com cadinhos grandes é desejável envolvê-los com um sistema de proteção térmica, antes da transferência para área de vazamento, como forma de prevenir um resfriamento rápido do metal e proteger o operador do calor do cadinho.

Momento antes do vazamento o fluxo de proteção sobre superfície do metal deve ser removido com uma escumadeira. O fluxo remanescente na borda do cadinho é removido com uma escova de aço. Durante o intervalo de tempo entre a remoção da escória e o vazamento, a queima do metal no cadinho é controlada por uma mistura de partes iguais em volume de enxofre na forma grosseiro e ácido bórico fino, ou material apropriado para esse fim. Esse material é borrifado na superfície do metal de modo a produzir uma camada protetora, e não formar uma mistura com o metal. Caso isso ocorra, arrastará material para dentro do molde ocasionando bolhas de gás ou outros defeitos que podem resultar na obtenção de fundidos defeituosos.

Quando o metal estiver pronto para o vazamento, a película formada pelo agente protetor é puxada para trás com uma escumadeira e uma leve quantidade de fluxo é polvilhada novamente sobre o metal. O cadinho é basculado e o metal derramado na bacia de vazamento de forma que a corrente de metal não desça diretamente pelo canal de entrada da peça. O uso apropriado da bacia de vazamento é absolutamente necessário para produção de um fundido de magnésio de boa qualidade. Sempre que no vazamento ocorrer oxidação na corrente do metal em movimento para dentro da bacia de vazamento e desde que o óxido de magnésio tenha praticamente o mesmo peso específico da liga de magnésio, ele não se separa da corrente não ser que a bacia de vazamento seja adequadamente projetada. As dimensões da bacia de vazamento variam com o tamanho do cadinho de onde o molde é vazado. Elas podem ser feitas de ferro fundido como núcleo, ou de areia verde socada em uma caixa. Em qualquer caso a bacia de vazamento deve ser projetada corretamente para que o fluxo

de metal do cadinho não vá diretamente para dentro do canal (AMERICAN FOUNDRYME'S SOCIETY, 1965a).

Outra forma de vazamento empregada, denominada “método preventivo”, emprega um ou mais pequenos canais de descida retangulares guiados diretamente para um canal de distribuição cego relativamente mais estreito, do qual o metal é levado via a um outro canal de distribuição que alimenta os canais de entrada da peça. Neste procedimento os canais de descida são rapidamente completados e mantidos cheios. Eles minimizam a turbulência e agem como um estrangulador mantendo uma taxa de vazamento lenta e uniforme. Para garantir que os canais de descida permaneçam cheios, uma descida levemente afunilada deve ser utilizada. O canal de distribuição cego e o respiro, que alivia a pressão de metal, recebe uma certa quantidade de escória que pode eventualmente entrar no molde (EMLEY, 1966).

2.8 DESMOLDAGEM E LIMPEZA DE FUNDIDOS DE MAGNÉSIO

2.8.1 Procedimentos gerais

O metal, após o vazamento, solidifica e resfria até a temperatura conveniente para manipulação. Após esse resfriamento, os fundidos devem ser retirados do molde para que a caixa seja levada novamente para operação de moldagem. Há vários métodos para remover os fundidos do molde. Um método comum é levantar a caixa de moldar superior por meio de uma talha e bater nas mesmas com marreta ou martelo. Outro procedimento é sacudir o fundido sobre uma mesa vibratória ou não, através da qual passa a areia.

Para remoção de machos pode-se usar também o processo de vibração, fixando no fundido um vibrador, operado por um cilindro de ar que remove os machos por meio de vibrações. Vários outros métodos, manuais ou mecânicos, poderão ser usados, principalmente, na produção de grandes quantidades de peças fundidas, onde são usadas máquinas vibradoras mecânicas localizadas no final de um sistema de transportadores (RECUSANI FILHO, 1971).

A operação seguinte consiste em transferir o fundido para a seção de limpeza, onde canais e alimentadores, rebarbas e outras partes são removidas. Após a separação da peça fundida e da areia, mediante remoção por vibração, são necessárias algumas operações antes que as peças estejam prontas para o uso ou para a usinagem e montagem. As operações consistem em: 1-Remoção do macho; 2 -Separação das peças dos canais e alimentadores; 3-limpeza das superfícies internas e externas; 4- Seleção; 5 - Rebarbagem e ação corretiva; e 6 – Inspeção (RECUSANI FILHO, 1971).

Na maioria dos fundidos de metais não ferrosos a areia de moldagem não adere muito à superfície das peças devido à temperatura de vazamento. Assim, a operação de limpeza não apresenta grandes problemas, com exceção dos fundidos de latão que devem ser mais trabalhados, pois a areia se funde e adere nos mesmos.

Há várias maneiras de separar as peças fundidas dos canais. Algumas fundições usam o método de retirá-los enquanto quentes. Os canais e os massalotes¹⁴ devem ser projetados para que separem num certo ponto, suficientemente distante da peça, a fim de evitar a quebra de uma parte da própria peça (RECUSANI FILHO, 1971).

2.9 INSPEÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE DE FUNDIDOS EM LIGAS DE MAGNÉSIO

2.9.1 Inspeção de rotina dos fundidos

As técnicas utilizadas para a inspeção de fundidos de magnésio são em geral as mesmas dos outros metais, mas é fundamental dar ênfase especial as particularidades e diferenças que algumas ligas de magnésio apresentam.

Procedimentos de inspeção, embora tenham como objetivo garantir que seja entregue somente fundidos de qualidade aceitável, também devem detectar no estágio inicial materiais defeituosos antes que qualquer processo seja realizado. Sempre que possível deve ser projetado a fim de permitir a identificação e o registro de defeitos proporcionando informações das quais os fatores envolvidos sejam identificados.

Para muitos casos os procedimentos de inspeção são adequados, entretanto modificações podem ser realizadas para determinados tipos trabalho (EMLEY, 1966)

2.9.1.1 Inspeção visual primária

Normalmente é realizada imediatamente após a retirada da peça do molde e serve tanto para eliminar peças defeituosas como identificar aqueles com defeitos recuperáveis em potencial.

Defeitos de superfície tais como escórias, bolhas de gás e outros superficiais, podem não ser visíveis antes jateamento, portanto a inspeção após esse processo é recomendável (EMLEY, 1966).

¹⁴ Massalote – o mesmo que alimentador ou montante. Um reservatório de metal líquido com a finalidade de alimentar as

2.9.1.2 Detecção de trincas

Esse procedimento deve ser feito após a retirada de rebarbas na superfície da peça, tratamento térmico, e em qualquer operação de solda que seja necessário.

Várias técnicas estão disponíveis e todas dependem da absorção de algum líquido pela trinca, da remoção do excesso da superfície do fundido e da subsequente exudação do líquido da trinca que é identificado pela cor ou fluorescência.

Esses processos também detectam qualquer porosidade na superfície, os microporos que agem da mesma forma que as trincas. Nenhuma das técnicas é infalível, mas usadas de forma inteligente podem ser de grande valia, e sua utilização é generalizada.

Antes destas técnicas a inspeção visual era prática comum, mas a probabilidade de inspeção errada devido a fadiga operacional ou a monotonia foi eliminada pelas técnicas atuais (EMLEY, 1966).

2.9.1.3 Ensaio radiográficos

Como resultado da diversidade de uso de fundidos de magnésio para uso aeronáutico durante os anos de guerra, associado com a procura de fundidos de alta qualidade destes fundidos, a radiografia, quando comparada aos outros metais, foi aplicada em larga escala no magnésio. A sua utilidade é indispensável no desenvolvimento de métodos de canais de alimentação para fundidos de alta qualidade, embora como as outras técnicas de inspeção, deve ser usada adequadamente, considerando suas limitações (EMLEY; FISHER, 1957).

Em desenvolvimento de técnicas de alimentação de peças, essas devem ser seccionadas e então radiografadas. Em ligas contendo alumínio a radiografia não detecta normalmente inclusões de óxidos a não ser que sejam muito grandes e contenham bolhas de ar. Portanto a radiografia deve ser suplementada por exames destrutivos no desenvolvimento dessas técnicas.

Devido a presença de elementos mais densos defeitos em fundidos de ligas de magnésio-zircônio são imediatamente revelados pela radiografia do que em ligas

contendo alumínio. Desse modo, camadas de óxidos são facilmente detectadas pela radiografia devido à densa precipitação do zircônio ao redor da camada de óxido.

Técnicas de fluoroscopia não são usuais em fundidos de magnésio, devido sua baixa sensibilidade, apesar de ter sido usada como exame preparatório para radiografia (EMLEY, 1966).

2.9.1.4 Exame de contaminação por fluxo

A ocorrência de problemas de inclusão de fluxo é rara em fundições bem estruturadas e nenhum teste para fluxo é normalmente realizado.

Exame visual no fundido revela a contaminação por cloreto na superfície e um exame mais profundo pode ser realizado através de técnicas já conhecidas (Figura 27).

A contaminação por cloreto também pode ser detectada nas superfícies fraturadas se estas forem armazenadas por algumas horas sob condições que impeçam a contaminação externa. Em qualquer técnica utilizada para detecção da contaminação por cloreto é sempre desejável que se evite a contaminação externa e é importante saber que esta contaminação pode mostrar resultados parecidos com os da contaminação normal (EMLEY, 1966).



Figura 27 - Aparência estriada de corrosão em liga do Magnésio devido à microporosidade causada por contaminação de fluxo (EMLEY, 1966).

2.9.2 Origem e a correção dos defeitos observados.

O propósito desse levantamento é cobrir todos os possíveis defeitos que possam surgir em ligas de magnésio. Convém lembrar que muitas toneladas de fundidos virtualmente perfeitos foram e estão sendo feitos, e que ligas de magnésio em

particular aquelas para uso aeronáutico serão usadas como referência de qualidade. Portanto, será conveniente classificar os vários defeitos de acordo com o teste que os revelará (EMLEY; FISHER,1957).

2.9.2.1 Defeitos visíveis de superfície

Defeitos tais como: superfície rugosa, rechupes, junta fria, buracos de areia (cavidades formada pelo desagregamento da areia), sopros, etc. podem ser referenciados como problemas de fundição que não estão dentro desse contexto (EMLEY,1966).

2.9.2.1.1 Reação do molde

Geralmente identificada por manchas brancas de óxido na superfície do fundido as reações do molde em ligas de Magnésio contendo Zircônio podem ocorrer sem que haja indicadores externos. O exame metalográfico mostra o afloramento de microporos em forma de teia de aranha (Figura 28), e, no caso de ligas contendo zircônio, o local evidencia a presença de grãos grandes e precipitação do Zircônio. A causa é o agente inibidor insuficiente, mais provavelmente, devido a perda de enxofre durante a estufagem do macho, ou da área de contato do metal com grandes seções, ou ainda de grandes escoamentos de metal quente.

O acúmulo de sais solúveis na areia de moldagem também provoca reação do molde e pode diminuir a permeabilidade. A reação do molde pode ser reduzida pela adição de Berílio ao metal, que ainda pode manter as propriedades mecânicas da liga (EMLEY, 1966).

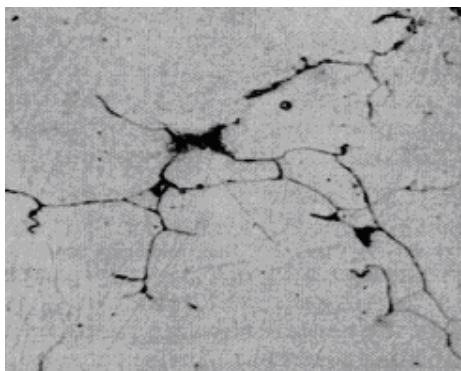


Figura 28 - Microporosidade tipo teia de aranha na Liga AZ91C(EMLEY, 1966).

2.9.2.1.2 Trincas

Trincas podem ser atribuídas ao uso de machos muito duros; a grãos grosseiros devido a um refino pobre nas ligas de Magnésio-Alumínio, ou ao baixo teor de Zircônio em ligas de Magnésio contendo Zircônio, ou ainda, a retirada do fundido do molde quando este ainda se encontra muito quente (Figura 29). Portanto, várias técnicas para detecção de trincas podem ser utilizadas em complemento ao exame visual feito nos fundidos (EMLEY; FISHER,1957).

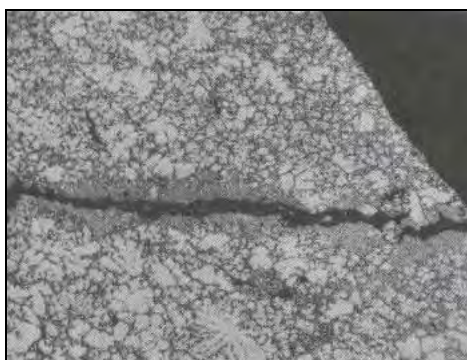


Figura 29 - Trinca a quente em fundição sob pressão. 75x
Liga AZ91C-F. (AVEDESIAN; BAKER,1999).

2.9.2.1.3 Superfícies de manchas azuis

Segregação inversa aparece na forma de uma mancha azulada, devido a presença do Mg_2Si (Figura 30). Pode ocorrer em ligas de Magnésio-Alumínio, particularmente as de qualidade comercial. A segregação inversa está associada a grãos grandes e a solução é evitar o vazamento à baixa temperatura seguido de resfriamento rápido com o objetivo de garantir um refino adequado do grão. É de pouca consequência prática, exceto se for de uma profundidade apreciável (EMLEY,1966).

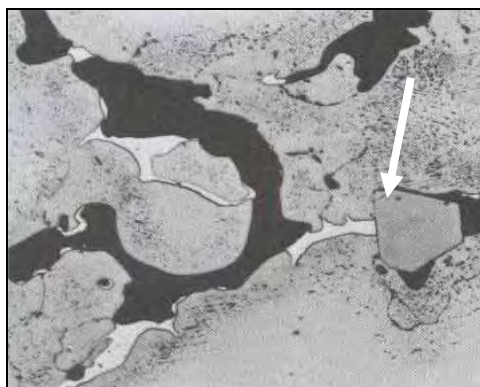


Figura 30 - Partícula hexagonal de Mg_2Si . Aparência da superfície, azulada. 500x. Liga Mg-Al (AVEDESIAN; BAKER,1999).

2.9.2.1.4 Pontos de corrosão

Podem ser devido às inclusões de fluxo ou de alguma forma por contaminação externa de cloreto. Por exemplo, exposição a poeiras contendo cloretos, colocação do fundido em contato com superfície contaminada por cloreto, dentre outros (Figura 31).

Normalmente exames de baixa amplitude mostram no centro da corrosão partículas não desagregadas de poeira ou de carepa de ferro causadas por contaminação externa, enquanto que exames microscópicos falham em revelar estruturas associadas ao fluxo de metal subjacente.

O diagnóstico das causas de inclusões de fluxo é geralmente percebido pela observação microscópica (EMLEY, 1966).



Figura 31 - Corrosão devido a contaminação do fluxo com cloreto sobre a superfície do magnésio (EMLEY, 1966)

2.9.2.2 Defeitos indicados na radiografia

Como já mencionado a radiografia é um método valioso para detectar porosidades, óxidos, partículas metálicas e segregação de certos elementos. Uma vez que a sensibilidade varia com a espessura da seção os defeitos são mais visíveis após a usinagem e a técnica é mais sensível quando aplicada destrutivamente em seções finas tiradas do fundido.

Por si só, fluxo em ligas de magnésio que não contêm zircônio não são normalmente visíveis por radiografia, embora as estruturas com as quais qualquer fluxo presente deveria estar associado, (Figura 32) a saber, óxidos e concentração de manganês, quando ocorrem, tornam se visíveis radiograficamente. (EMLEY; FISHER, 1957).

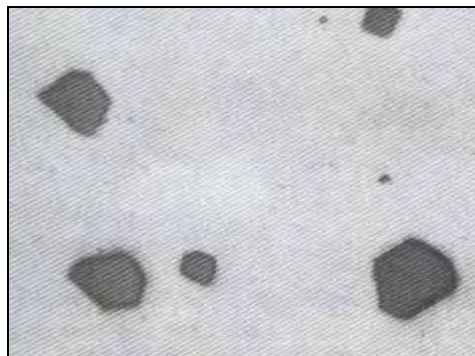


Figura 32 - Cristais primários de manganês em ligas fundidas de magnésio livre de alumínio. 500 x. (EMLEY, 1966).

2.9.2.2.1 Óxidos

Embora as inclusões de óxidos nas ligas de magnésio tenham aparência escurecida, elas aparecem claras nas ligas contendo zircônio (Figura 33) devido à precipitação das partículas de zircônio no óxido de magnésio. Por esta razão a radiografia é incomparavelmente mais sensível para a detecção de óxidos em ligas de zircônio do que para outras ligas de magnésio.

Muito excepcionalmente óxidos escuros aparecem em radiografias de ligas de zircônio indicando que escórias de óxidos pesados estão associadas com cavidades. Isto tem sido observado quando o fluxo de cobertura foi removido completamente antes do vazamento, o metal vazado quente e rapidamente (EMLEY, 1966).

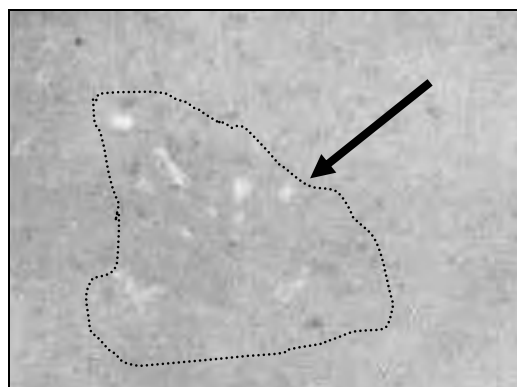


Figura 33 - Óxidos pesados associados a vazios (pontos escuros) (EMLEY, 1966).

2.9.2.2.2 Variações de densidade radiográfica

Uma característica interessante das ligas de magnésio contendo zircônio é a ocorrência ocasional de áreas com densidades radiográficas diferentes, embora não seja necessário detectar homogeneidade do metal no exame microscópico. Testes de tensão em miniaturas de corpos de prova tomados transversalmente na junção de tais áreas mostram normalmente que não existem pontos de fragilidade no local ou em geral no metal. O fenômeno é devido talvez a presença de zircônio como um precipitado sub-microscópico nas regiões mais claras (EMLEY; FISHER, 1957).

2.9.2.2.3 Microporosidades

As ligas de Mg-Al, mesmo quando completamente refinadas, parecem com a liga Al-10%Mg, exibindo uma “camada de porosidade” disposta em ângulo reto na direção do gradiente de temperatura. As ligas de Mg-Zr apresentam “faixas” ou porosidades concêntricas, em forma de redemoinho, distribuídas de uma maneira diferente de outras ligas não ferrosas. Assim, a porosidade em uma barra fundida, arredondada, tende a se distribuir na forma de uma camada horizontal, nas ligas de Mg-Al, mas em ligas de Mg-Zr, na forma de conchas concêntricas verticais. Em algumas ligas de Magnésio livre de zircônio e com alto teor de Zinco é possível refinar o grão com ferro, tendo sido observado a presença de porosidades concêntricas. O fenômeno pode estar associado com a produção de grãos extremamente finos pelo processo de nucleação, que pode induzir porosidades nas ligas de Mg-Al se mais agentes refinadores de grão forem encontrados (Figura 34) (EMLEY, 1966).



Figura 34 - Microporosidade de contração. Liga AZ92A-T6 fundida em areia verde. 100x. (AVEDESIAN; BAKER, 1999).

2.9.2.2.4 Reação do grão de areia

Elas aparecem nas radiografias das ligas de magnésio contendo zircônio como áreas claras e circulares bem definidas (Figura 35) de aproximadamente 1mm de diâmetro e em profundidade com as bordas mais claras do que a região central (EMLEY, 1966).



Figura 35 – Aspectos da reação de inclusão de areia (EMLEY, 1966).

2.9.3 Controle de qualidade do fundido

2.9.3.1 Composição química

Amostras de fundidos para análises químicas ou espectrográficas podem ser obtidas em moldes resfriados em carbono revestido com cobre, as quais apresentam uma seção resfriada de 3,17mm (1/8”) de espessura, representando provavelmente a melhor superfície para análise espectrográfica no que diz respeito a uma possível segregação de alumínio. Para esse tipo de análise é preferível uma amostra resfriada lentamente, capaz de desenvolver uma segregação aceitável no molde de carbono (EMLEY; FISHER, 1957).

2.9.3.2 Testes mecânicos

Testes de tensão são realizados em corpos de prova separados do fundido, conforme Figura 36 e dimensões mostradas na Tabela 20, proporcionando um valioso controle da qualidade. O corpo de prova da norma inglesa D.T.D. não parecer ser completamente adequado para o magnésio, uma vez que os resultados obtidos dependem da habilidade do fundidor, e um corpo de prova fundido horizontalmente

apresenta melhores resultados, especialmente para ligas de magnésio contendo zircônio (EMLEY; FISHER, 1957).

A prática oficial varia em diferentes países com relação a significância do teste realizado com o corpo de prova fundido separadamente daquele retirado diretamente da peça fundida.

As pesquisas sustentam que os corpos de prova retirados da peça fundida não podem representar a qualidade e as propriedades de um fundido. Se o corpo de prova for obtido sob condições controladas, ele pode representar a qualidade do fundido, todavia se fazem necessários alguns cuidados. Com corpos de prova fundidos (vazados) separadamente os valores do alongamento e das tensões são afetados pela qualidade da superfície, particularmente para ligas de baixa ductilidade.

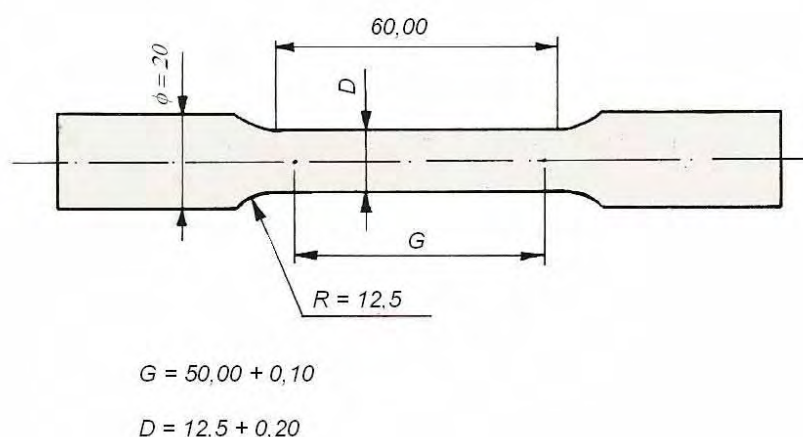


Figura 36 - Corpo de prova para ensaios de tensão em ligas de magnésio (ASTM E 8M-95, 1995).

Tabela 20 – Dimensões dos Corpos de Prova (ASTM E 8M-95, 1995).

DIMENSÕES		
	Descrição	mm
G	Comprimento do GAGE (dimensão útil)	50 ± 0,10
D	Diâmetro	12,50 ± 0,20
R	Raio	12,5
A	Comprimento da Seção Reduzida	60
B	Comprimento da Garra	75
C	Diâmetro das Extremidades	20

2.10 CONSIDERAÇÕES DE CARÁTER METALÚRGICO DO FUNDIDO

2.10.1 Qualidade requerida nos fundidos

Todos os fundidos contém potencialmente diminutos defeitos, e fabricantes e usuários estão sujeitos ao problema de avaliar o nível de defeitos que pode ser tolerado (EMLEY; FISHER, 1957).

Na prática, esta avaliação é feita de comum acordo entre fabricantes e usuários. A tendência natural em tais condições e em caso de dúvida é rejeitar, de forma que se as partes não têm experiência existe um risco de que todos fundidos que mostrem defeitos sejam rejeitados, e desta forma criar uma situação de impossibilidade padrão para a fundição.

Pode-se imaginar quantos fundidos potencialmente satisfatórios têm sido rejeitados devido a falta de informação confiável sobre o efeito de alguns defeitos presentes.

Infelizmente é difícil apresentar evidências factuais adequadas para as aplicações gerais dos defeitos, uma vez que diferentes tipos de fundidos são projetados para resistir a várias combinações de tensões. Pesquisadores têm demonstrado que a microporosidade superficial e outros defeitos internos tem relativamente pouco efeito na fadiga, ao contrário, as condições de superfície e de projeto são de vital importância.

Busk¹⁵ (1942 apud EMLEY, FISHER, 1957) estudou a avaliação da microporosidade em ligas Mg-Al e sua correlação dos resultados com dados de tensão e fadiga.

Foi verificado que corpos de prova retirados do fundido dão pouca informação e servem principalmente como um controle da qualidade do metal, razão pela qual é preferível obter à parte corpos de prova padrão do fundido sob condições controladas. Em algumas ligas o efeito de inclusões de óxidos na resistência à tração depende da sua localização no corpo de prova. O afloramento de uma pequena película de óxido é

¹⁵ R. S. Busk, Proc. Amer. Soc. Test. Mat., 1942, 42, 1076

mais danoso do que uma grande inclusão na seção na seção reduzida do corpo de prova (EMLEY; FISHER, 1957).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Por ser desenvolvida com base em procedimentos metalúrgicos diferenciados a tecnologia de desenvolvimento de semicubos de roda aeronáuticos exige um padrão de qualidade acima demais processos na obtenção de componentes aeronáuticos. A complexidade do processo requer conhecimento técnico específico em fundição de ligas leves para que possa atender o nível de qualidade metalúrgica específica desses componentes. Desse modo, a técnica de fundição aplicada no desenvolvimento do semicubo de roda do trem de pouso principal da aeronave C-115 “Buffalo” mostrado nas Figuras 37a, 37b, 37c e 37d, foi desenvolvido em liga de magnésio AZ-91C usando moldes de areia verde, que apresentam menor custo em relação a outros

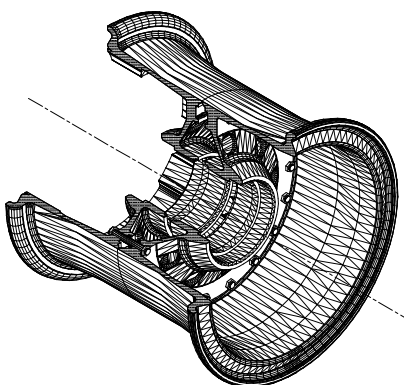
**a****b****c****d**

Figura 37 – a - Aeronave C-115 “Buffalo”; b – Vista frontal do conjunto de semicubos de roda do trem principal da aeronave; c – Cubo de roda em perspectiva; d – Vista lateral conjunto de semicubos de roda do trem principal da aeronave.

processos de moldagem, versatilidade na obtenção de peças isoladas e/ou em série e a melhor possibilidade de obtenção de um bruto de solidificação com uma estrutura adequada ao tratamento térmico previsto em projeto.

O *cubo de roda* é um componente estrutural mecânico que trabalha sob condições rígidas de esforços estáticos e dinâmicos e em situações críticas de cargas variadas nas operações de pouso e decolagem e de permanência em solo. Resulta da união de dois componentes metálicos denominados - *semicubos*, mostrado nas Figuras 37c e 37d, cujas faces opostas são unidas através de uma junta de fixação, presas por um conjunto de parafusos de fixação, passantes, e selado por um anel de vedação circundando o plano de apartação. O *cubo de roda* é revestido por um pneu de borracha, sem câmara, inflado com ar comprimido e localizado na parte inferior da aeronave. Apoiado a uma perna de força central ligada à estrutura principal de sustentação da aeronave para recebe e distribuir a carga, o cubo de roda é composto por dois *semicubos*. O *semicubo liso*, denominado “*fêmea*”, representa a parte externa do cubo de roda, onde está localizado o bico de enchimento e o *semicubo com chaveta*, denominado “*macho*”, representa a parte interna da roda, que abriga o sistema de alojamento de freio da aeronave.

3.2 MÉTODOS

A metodologia empregada no desenvolvimento dos *semicubos* aeronáuticos foi elaborada levando em consideração as características e particularidades do processo.

Esta metodologia foi criada em etapas seqüenciais dispostas em fluxograma geral, mostrado na Figura 38 e em fluxogramas auxiliares de detalhamento ilustrados nas Figuras 39, 42, 66, 67 e 72.

Cada ação proposta no quadro de atividades retrata o desenvolvimento que foi realizado em cada etapa do processo obedecendo rigorosamente o fluxo seqüencial, oferecendo confiabilidade à metodologia implementada.

Dentre as etapas elencadas no processo de obtenção dos *semicubos* foram tomados como referência os módulos de *Preparação da Areia, Moldagem, Cálculo da Carga Metálica, Fusão e Controle de Qualidade* que retratam a essência do processo de fundição permitindo criar uma visão abrangente do procedimento.

3.3 FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO APLICADO NO DESENVOLVIMENTO DE SEMICUBOS AERONÁUTICOS

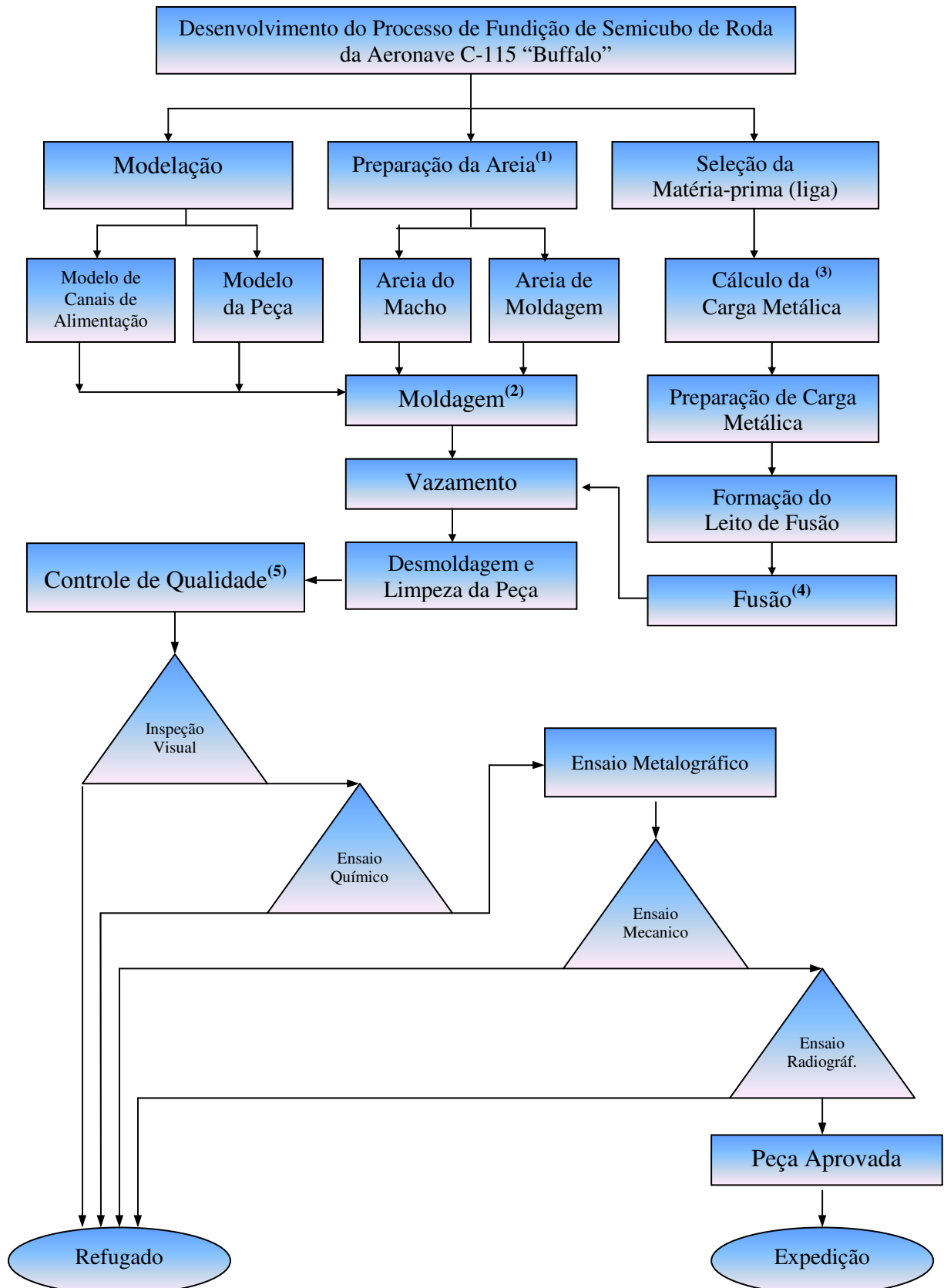


Figura 38 – Fluxograma do Processo Aplicado.

3.3.1 Detalhamento das principais etapas do processo de fundição

3.3.1.1 Preparação da areia

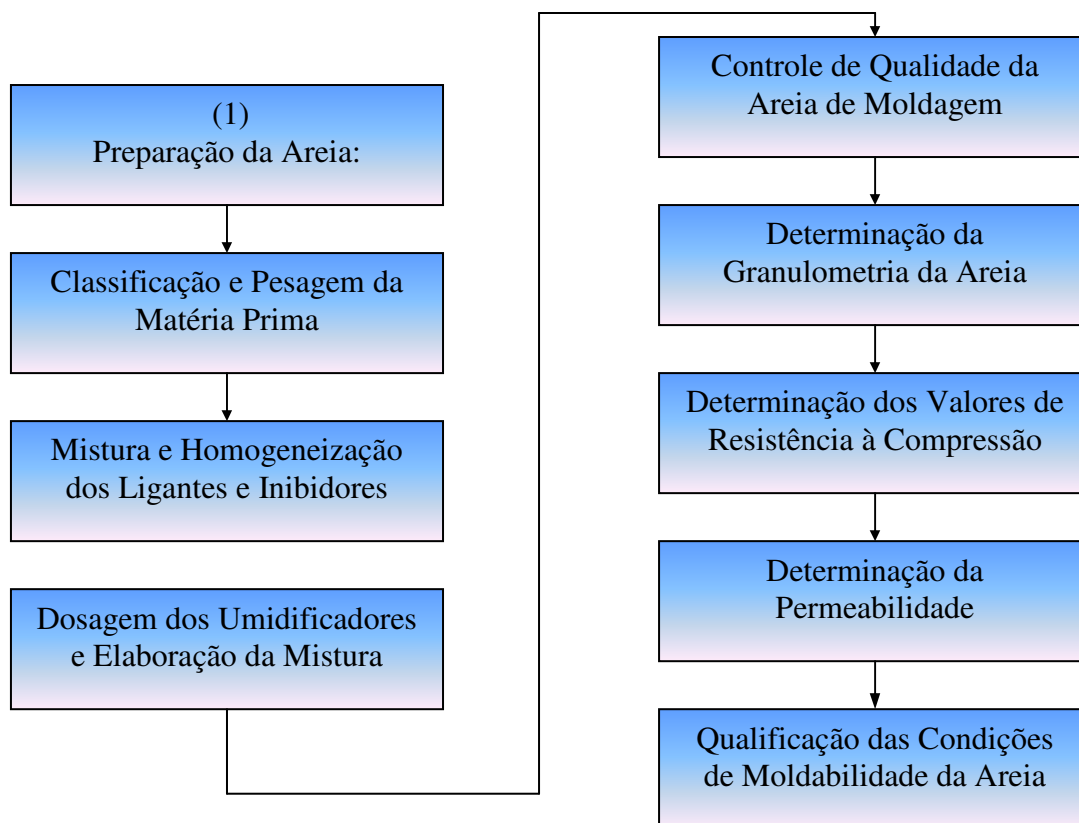


Figura 39 – Detalhamento do Processo de Preparação da Areia

3.3.1.1.1 Materiais empregados na preparação da areia de moldagem:

- Areia Sintética - Módulo de Finura (MF-100)
- Bentonita Cálcica - NT-25 S
- Enxofre em pó - malha # 250
- Ácido Bórico em pó - malha # 250
- Dietileno Glicol – Suspensão Líquida
- Água
- Ácido Bórico em Pó - malha 250

3.3.1.1.2 Classificação e pesagem da matéria prima

A areia, aglomerantes e inibidores utilizados na moldagem foram obtidos junto a empresas especializadas no comércio de matérias primas de moldagem para fundição. A areia sintética fornecida era previamente tratada (lavada, seca, livre de impurezas, matérias orgânicas e baixo teor de argila) e o módulo de finura definido de acordo com projeto. Os materiais usados na mistura eram classificados e pesados conforme a seqüência de adição no misturador: material refratário(*areia*), aglomerante inorgânico (*ligantes*), aditivos inibidores e plastificantes (*umidificadores*).

3.3.1.1.3 Mistura e homogeneização dos ligantes e inibidores

A mistura usada na preparação das areias de moldagem foi especificada, selecionada e submetida a ensaios para caracterização das propriedades de moldagem no Laboratório de Areias da Fundição de Ligas Leves da Divisão de Materiais – AMR, do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), do Centro Técnico Aeroespacial (CTA), a ser usada na moldagem dos semicubos de rodas da aeronave C-115 “Buffalo”.

A preparação da mistura (areia, ligantes, inibidores e umidificadores) obedeceu a seqüência de adição no misturador, vide Figura 40, conforme a ordem prevista na composição: Areia do Mar/MF-100, Bentonita Cálcica/NT-25S, Enxofre e Ácido Bórico em pó, Dietileno Glicol e Água, que foram homogeneizados no tempo de mistura pré-estabelecido para a caracterização das propriedades de moldagem.



Figura 40 – Misturador utilizado na preparação da areia de moldagem

3.3.1.1.4 Dosagem dos umidificadores e elaboração da mistura

A dosagem dos umidificadores foi estabelecida conforme a composição da mistura envolvendo o módulo de finura da areia, inibidores, ligantes e o tempo de homogeneização previsto. A elaboração da mistura, foi feita em misturador marca Simpson, vide Figura 40, série 705, modelo LH-600, com capacidade para 120 kg de mistura, onde os ingredientes foram previamente adicionados e homogeneizados a seco, por 60 segundos e, em seguida, adicionados os umidificadores (água e acetileno glicol) em quantidades predeterminadas conforme a composição estabelecida.

3.3.1.1.5 Controle de qualidade da areia de moldagem

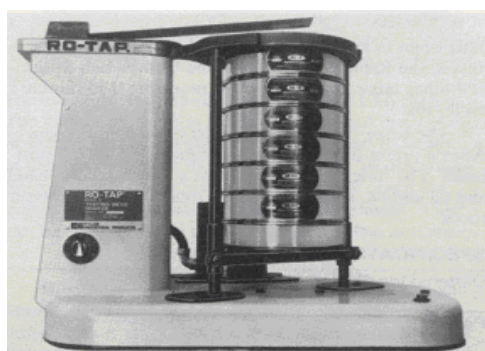
A mistura usada no processo de moldagem foi submetida ao controle das propriedades de moldagem através de ensaios de determinação das características para verificar sua adequabilidade com os parâmetros de moldagem referenciados na literatura. Foram realizados ensaios de módulo de finura, resistência à compressão e permeabilidade.

As formulações adotadas foram ensaiadas de acordo com método IPT-M-34¹⁶ (Análise Granulométrica), M-36¹⁷ (Preparação dos Corpos de Prova), M-37¹⁸ (Permeabilidade) e M-38¹⁹ (Resistência à Compressão).

Para o controle de qualidade das areias de moldagem foram usados nos ensaios os equipamentos da HARRY W. DIETERT CO. Os ensaios foram realizados com os seguintes equipamentos:

- 1- Misturador com peneiras para ensaio de granulometria – Figura 41a.
- 2- Tubo preparador do corpo de prova semicilíndrico - Figura 41b.
- 3- Martelete e acessórios para a compactação e preparo do corpo de prova - Figura 41c.
- 4- Extrator do corpo de prova - Figura 41c.
- 5- Suporte semicilíndrico com corpo de prova - Figura 41d.
- 6- Máquina universal para ensaio de resistência da areia - Figura 41e.
- 7- Permeâmetro (medidor de permeabilidade) - Figura 41f.

^{16,17,18,19} Método de Ensaio Elaborado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, 1965.



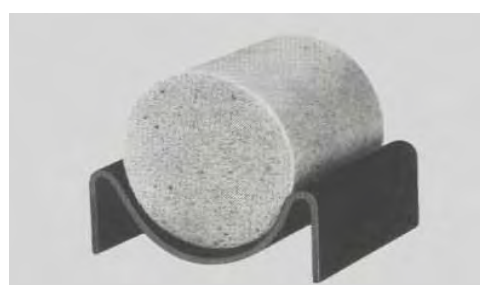
(a)



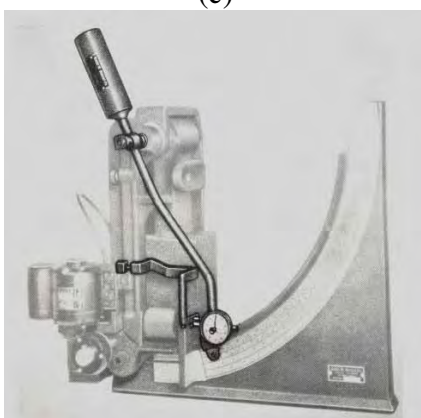
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 41 – Equipamentos utilizados no controle de qualidade das areias de moldagem.

(a) Peneirador para ensaio granulométrico (b) Tubo preparador do corpo de prova semi cilíndrico (c) Martelete e acessórios para a compactação e preparo do corpo de prova (d) Suporte semi cilíndrico com corpo de prova (e) Máquina universal para ensaio de resistência da areia (f) Permeâmetro (medidor de permeabilidade).

Os equipamentos mostrados na figura 41 foram utilizados na caracterização das propriedades da areia de moldagem que foram ensaiadas no Laboratório de Areias da Fundação de Ligas Leves da Divisão de Materiais – AMR, do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), do Centro Técnico Aeroespacial (CTA).

3.3.1.1.5.1 Determinação da granulometria da areia

Para a determinação da análise granulométrica da areia de moldagem que permite estabelecer os índices de módulo de finura AFS, porcentagem de finos, coeficiente de distribuição e uniformidade, o procedimento adotado foi de acordo com o método M-34 usando-se uma amostra de areia do mar, lavada, isenta de resíduos orgânicos e com baixo teor de argila. A determinação da granulometria foi feita através de um conjunto de peneiras classificadoras e prato, colocado no peneirador para ensaio granulométrico, conforme mostra a Figura 41a.

3.3.1.1.5.2 Determinação dos valores de resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão permite que o molde possa suportar a pressão do metal na cavidade do molde sem se deformar. O procedimento adotado foi de acordo com o método M-38 usando-se corpos de prova a verde moldados no tubo preparador (Figura 41b) pelo método IPT M-36. A resistência à compressão foi medida em Máquina Universal “Dietert” como mostra a Figura 41e.

3.3.1.1.5.3 Determinação da permeabilidade

A permeabilidade é uma propriedade de grande interesse para as areias de moldagem de magnésio e suas ligas que necessitam de boa ventilação para exaustão dos gases gerados durante o vazamento.

Por ser uma propriedade importante que indica se o molde apresenta condições de proporcionar um bom escoamento dos gases, a sua determinação foi viabilizada através do método M-37 usando-se corpos de prova a verde, moldados em tubo preparador (Figura 41b), pelo método M-36 e submetidos a ensaios através de um medidor de permeabilidade (permeâmetro), mostrado na Figura 41f.

3.3.1.1.6 Qualificação das condições de moldabilidade da areia

A areia de moldagem ao ser preparada para a operação de moldagem deve apresentar características de moldabilidade para que possa ser usada na operação propriamente dita. No caso das areias de moldagem para ligas de magnésio estas são previamente ensaiadas antes da aplicação e para tanto devem apresentar propriedades compatíveis (permeabilidade, resistência à compressão, deformação) com as características de moldabilidade exigidos para os moldes a verde. Com essas características, em função dos valores apresentados nos ensaios de caracterização, as areias passam a oferecer condições satisfatórias e confiáveis de moldabilidade na preparação dos moldes para magnésio.

3.3.1.2 Moldagem

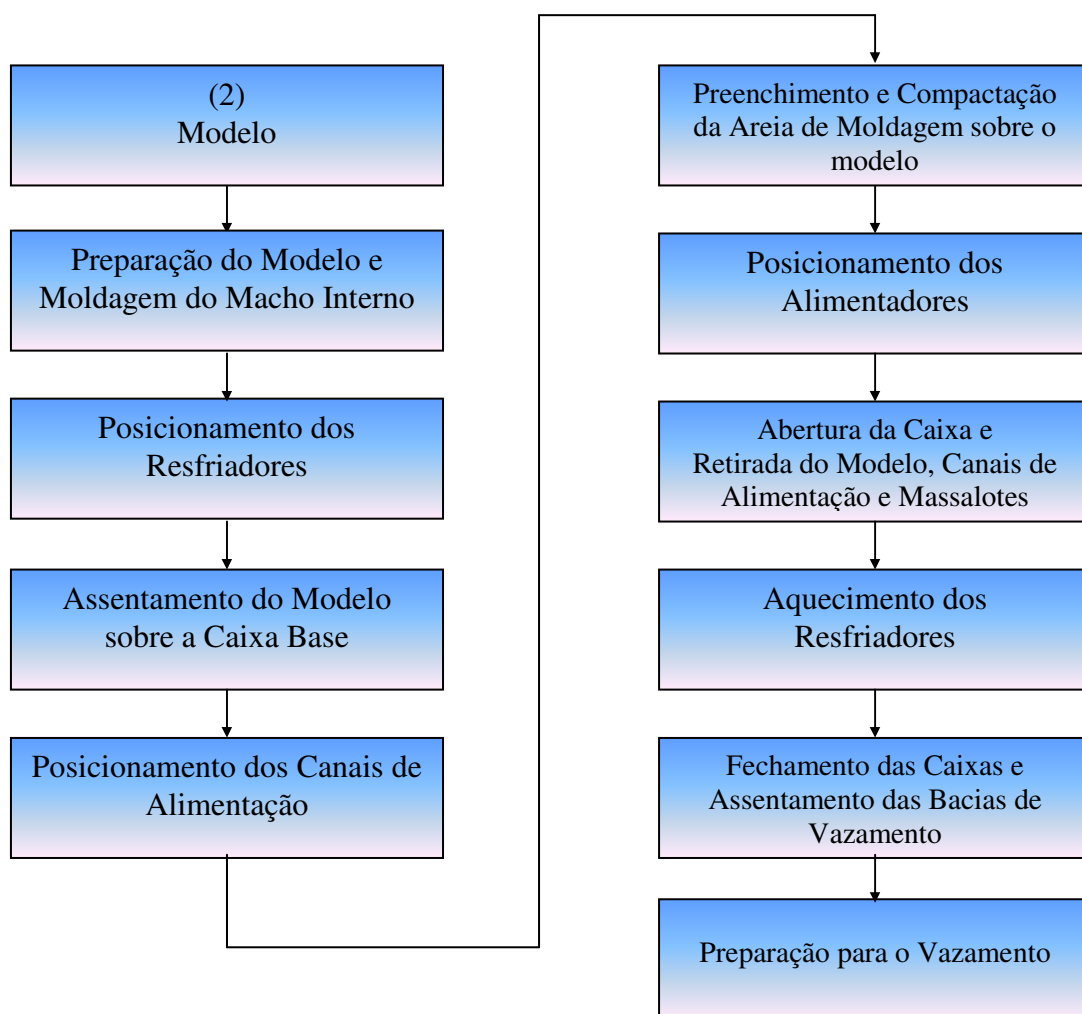


Figura 42 – Detalhamento do Processo de Moldagem

3.3.1.2.1 Materiais empregados na moldagem

- Caixa de Moldagem Expansiva – Liga de Alumínio AA-356
- Travessão de sustentação da areia (Caixa Superior) - Liga Alumínio AA-356
- Canal de Descida, tipo “Lápis” - Madeira (compensado naval).
- Caixa da Bacia de Vazamento - Liga de Alumínio AA-356
- Reguladores de Pressão – Madeira (Imbúia)
- Canal de Distribuição e de Ataque, formato em “Estrela” - Madeira (compensado naval).
- Resfriador Circular em Aço baixo Carbono, ranhurado, espessura - 19 mm - Região externa Flange.
- Resfriador Circular em Aço baixo Carbono, ranhurado, espessura - 19 mm - região Interno dos Furos de Fixação.
- Alimentadores para a região da Fixação - 02 (dois) na forma retangular e 04 (quatro) na forma tronco-piramidal.
- Resfriadores em aço baixo carbono – Região das Chavetas.
- Ganchos em Aço - Suporte do Bolo de Areia Caixa Superior
- Semicubo de Roda - Liga de Alumínio AA-356
- Licopódio – Talco Desmoldante para o Modelo
- Grafite em Pó – malha # 250

3.3.1.2.2 Materiais empregados na confecção do modelo e do sistema de alimentação da peça

- Modelo do Semicubo - Liga de Alumínio AA-356
- Sistema de Alimentação – Canais de Descida, Distribuição, Ataque e Reguladores de Pressão - Madeira (compensado naval).
- Alimentadores - Liga de Alumínio AA-356
- Resfriadores em Aço baixo Carbono – Região do Flange, Fixação e Chavetas.

3.3.1.2.3 Modelo

Pelas características da peça (semicubo) e do processo de moldagem utilizado, o modelo solto “mono-bloco”, mostrado nas Figuras 43 e 44, é considerado o mais

apropriado ao processo manual por ser um modelo com linhas e dimensões bem definidas, uma superfície plana que serve para fazer a linha divisória do molde e não apresenta marcação de macho.

O material escolhido para a elaboração do modelo foi a liga de alumínio AA - 356, fundida em areia, por apresentar boas características de aplicabilidade e importantes características estruturais.

O modelo do semicubo usado no projeto, ilustrado na Figura 43, representa a parte interna do cubo de roda principal denominado semicubo “macho” por apresentar mecanismos de trava (chavetas) para o alojamento do sistema de freio da aeronave.

O modelo do semicubo ilustrado na Figura 44 representa a parte externa do cubo de roda principal denominado semicubo “fêmea” por apresentar o interior liso não contendo mecanismos de trava do alojamento de freio da aeronave.

O material empregado na usinagem do modelo do semicubo de roda foi um bloco cilíndrico compacto, em liga de Alumínio AA-356, com as seguintes dimensões: $h=178\text{mm}$ e $\varnothing = 370\text{ mm}$ para o processamento do modelo de acordo com as especificações e exigências do projeto:

- 1) Tolerâncias dimensionais – tolerância das dimensões linear (não usinadas): 3mm
- 2) Material a ser usado na elaboração do modelo - Liga de Alumínio AA – 356 Al – 7,0%Al - 0,35%Mg.
- 3) Tipo de Modelo: solto monobloco, com abertura da cavidade do molde na caixa de cima e cavidade do macho cilíndrico e ou semicilíndrico na caixa intermediária para retirada do modelo, assentado na caixa inferior.
- 4) Superespessura de usinagem: assinalada no desenho do modelo pelo símbolo (▼).
 - 4.1 – Superfícies Externas Planas: 2,4mm
 - 4.2 – Superfícies Cilíndricas: 3,2mm
 - 4.3 – Superfície Superior: 3,2 mm
- 5) Contração de Solidificação: Aplicada conforme a contração linear do metal. Magnésio – 1,3%
- 6) Ângulo de Saída
 - 6.1 – Das Superfícies da Peça perpendiculares ao Plano de Apartação: 5°

6.2 – Das Retiradas do macho

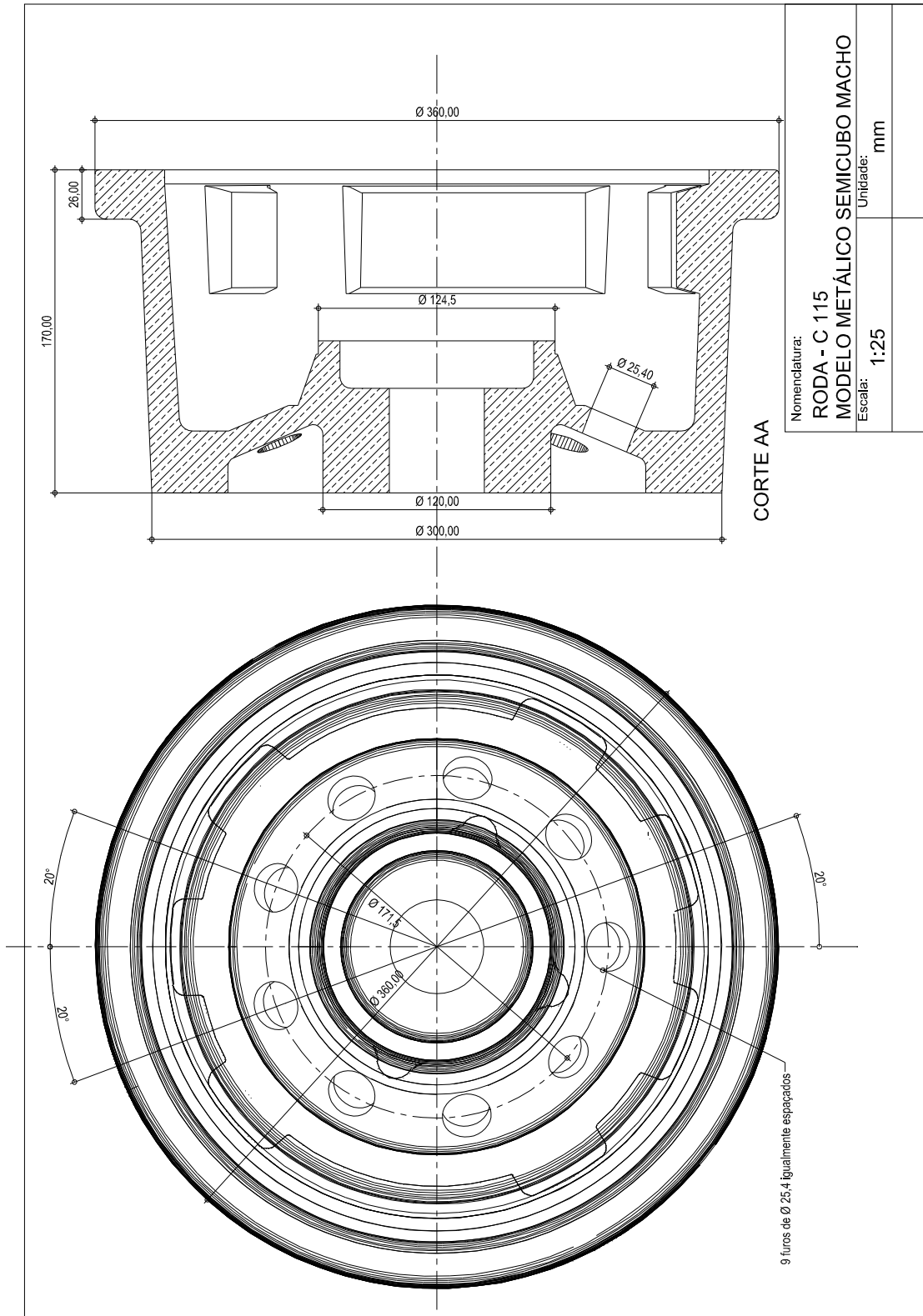
6.2.1 – No suporte do Eixo: $18^{\circ} 30'$ 6.2.2 – Na superfície interna da peça: 5° .

Figura 43 - Modelo solto do semicubo com chavetas (macho)

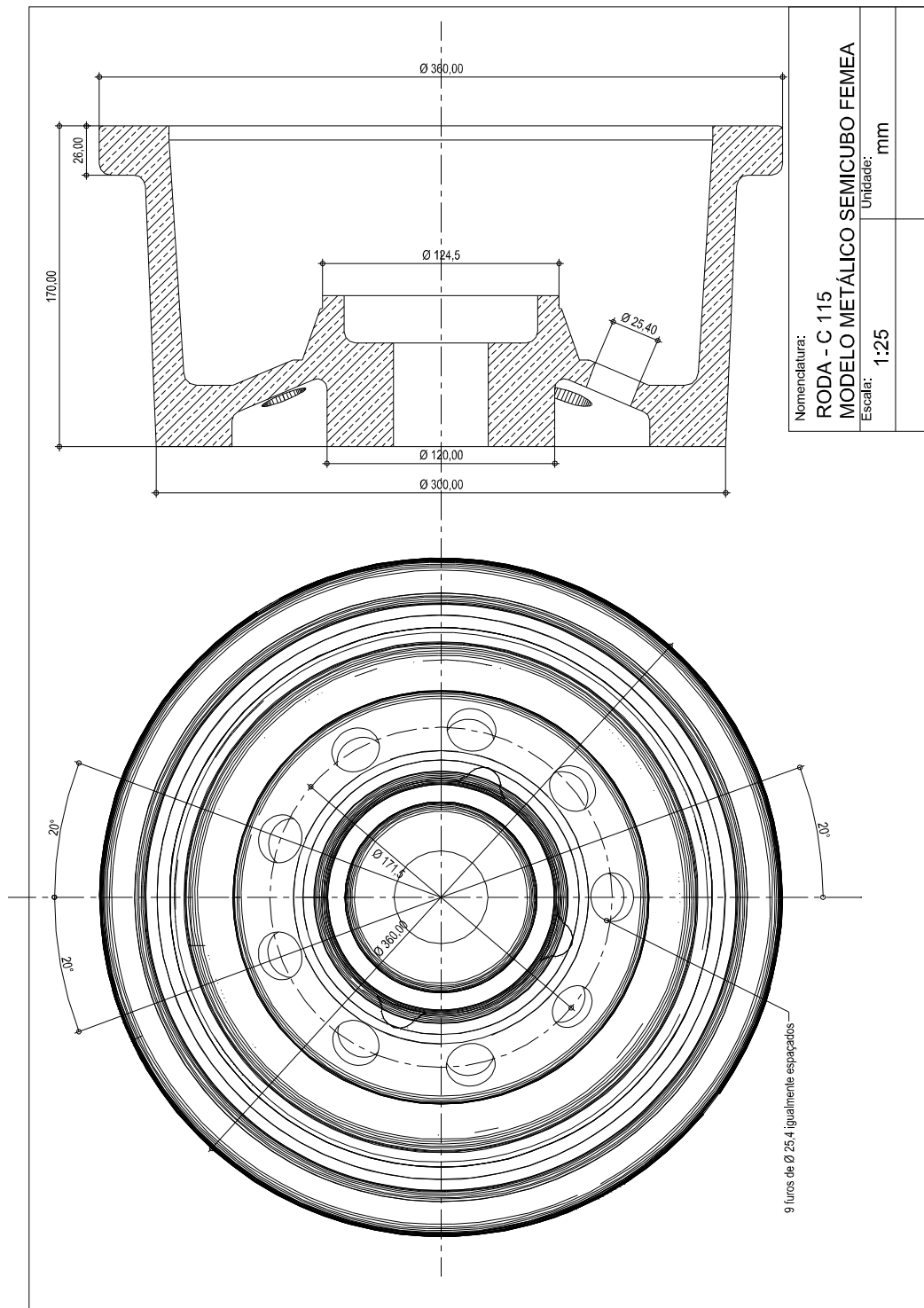


Figura 44 - Modelo solto do semicubo sem chavetas (fêmea)

Para otimizar os canais e sistema de alimentação na fundição dos semicubos de roda foi levado em consideração os seguintes fatores: peso, volume e área da superfície do fundido, volume e dimensão dos alimentadores, volume da areia de moldagem, área e volume dos canais, modelo específico de canais e regras práticas de projetos de fundição.

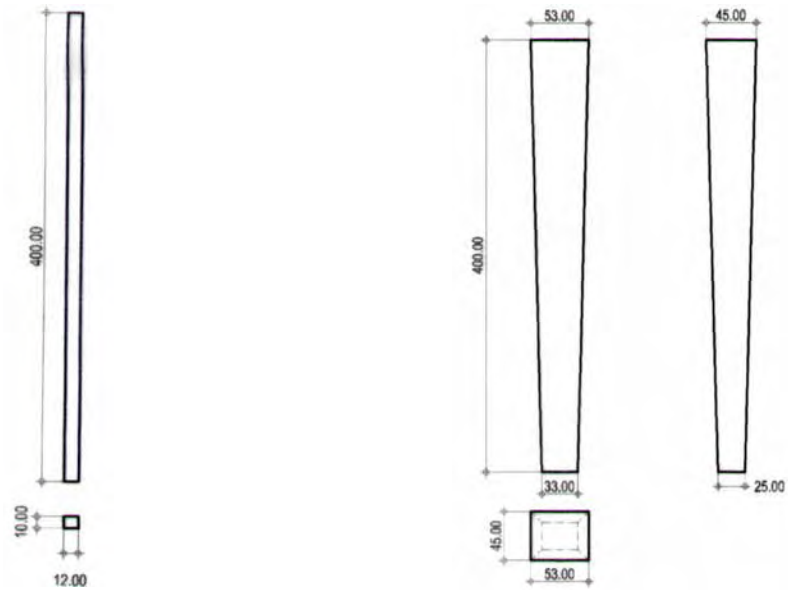


Figura 47 – Canais de ataque (tipo lápis) Figura 48 – Reguladores de pressão

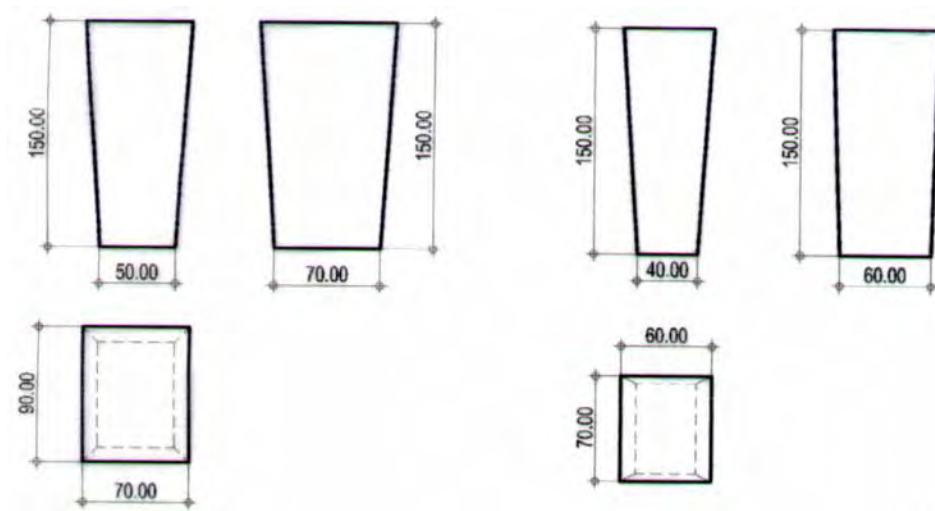


Figura 49 - Alimentadores posicionados na região dos furos de fixação

Os alimentadores, mostrados na Figura 49 e 50, são do tipo a céu aberto e foram projetados e dimensionados de acordo com as recomendações técnicas específicas para a liga de magnésio, cuja altura varia de 2 a 2,5 vezes a área da seção de contato para proporcionar pressão metalostática suficiente durante a solidificação.

Os alimentadores usados no projeto inicial estão dispostos de acordo com a seguinte ilustração da Figura 50: Colocação de 04(quatro) alimentadores tronco-piramidais de base retangular na parte superior da peça, região dos furos de fixação, e (01) um alimentador cilíndrico sobre a superfície do furo do eixo central do semicubo.

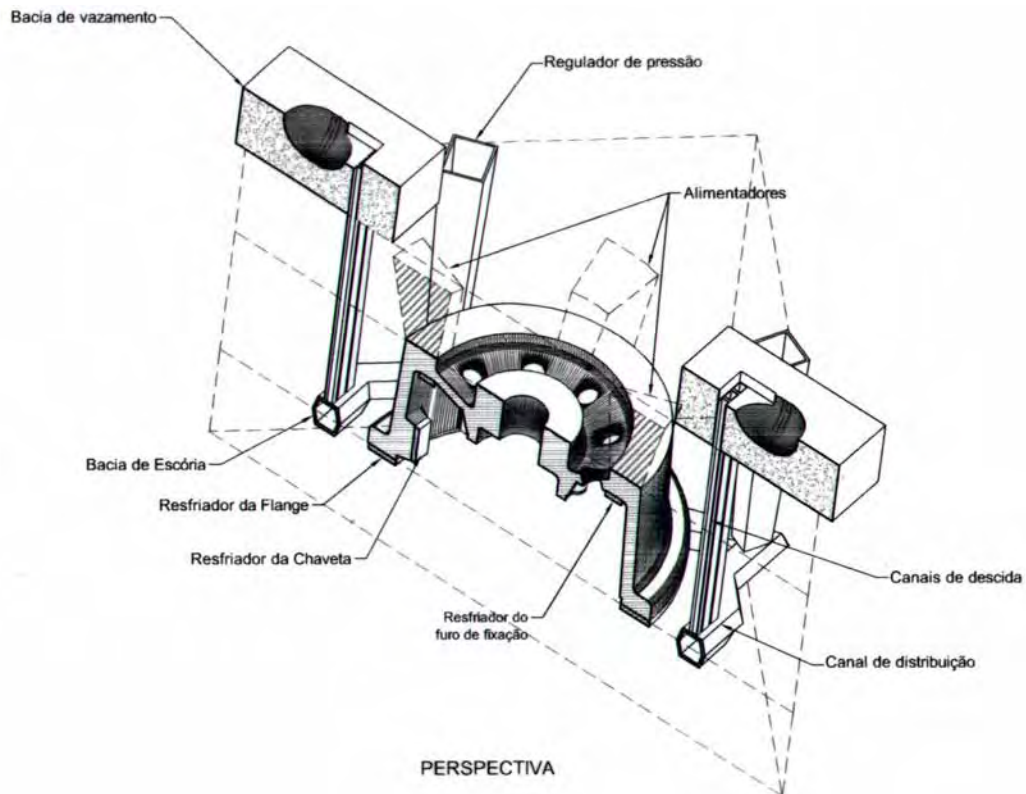


Figura 50 – Perspectiva do posicionamento dos alimentadores e resfriadores

Os resfriadores projetados em aço baixo carbono SAE 1020 ilustrado nas Figuras 50 a 53, embora não sejam componentes do sistema de alimentação, são mecanismos adotados com a finalidade de uniformizar a temperatura de solidificação das regiões mais espessas da peça facilitando o direcionamento de gradientes térmicos favoráveis peça-alimentador na solidificação.

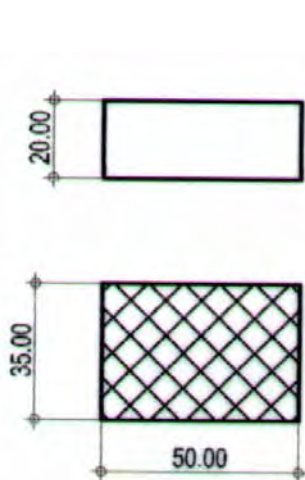


Figura 51 - Resfriador da região das chavetas

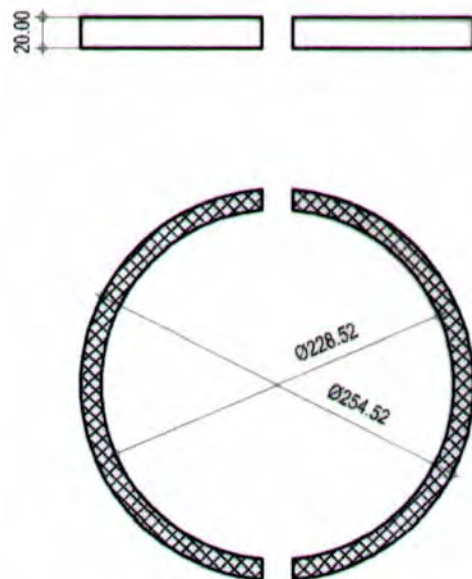


Figura 52 - Resfriador da região da fixação

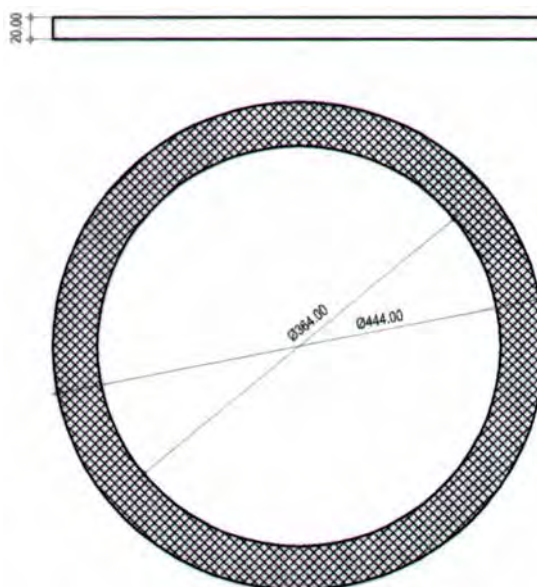


Figura 53 - Resfriador da região do flange

3.3.1.2.4 Preparação do modelo e moldagem do macho interno

Antes do início da moldagem deve ser feita a limpeza do modelo para retirada de sujeiras, graxas, impurezas, etc. de modo que possa receber uma camada de licopódio (desmoldante em pó usado para evitar a aderência dos grãos de areia durante a desmoldagem).

A operação subsequente consiste em posicionar os resfriadores na parte interna dos furos de fixação e preencher com areia de moldagem sob forte compactação, moldando a cavidade interna do semicubo reproduzindo o macho em areia verde conforme ilustrado na Figura 54.

3.3.1.2.5 Posicionamento dos resfriadores

Durante a preparação do macho em areia verde, os resfriadores circulares são posicionados na região interna do furo de fixação e na região das chavetas sendo fixados pela areia de moldagem na elaboração do macho. Simultaneamente, o resfriador da região do flange é posicionado no centro da caixa base, no mesmo nível do plano de apartação da caixa, conforme mostrado na Figura 54.



Figura 54 - Moldagem do Macho Interno e colocação do resfriador na caixa base

3.3.1.2.6 Assentamento do modelo sobre a caixa base

O assentamento do modelo sobre a caixa base foi feito após a preparação do macho e da caixa base com areia de faceamento, com o uso de bastões socadores manuais, de aço, para compactar e nivelar a areia na caixa de moldagem. O excesso foi retirado com espátula metálica até o completo nivelamento da areia no plano de apartação da caixa que recebe o modelo sobre a superfície da areia, como mostra a Figura 55.

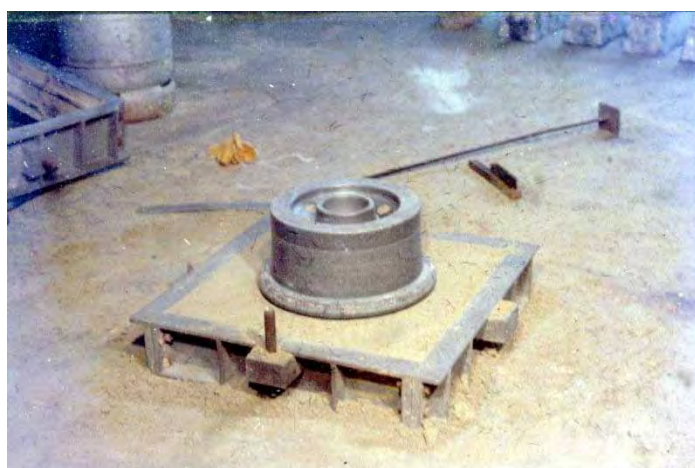


Figura 55 – Assentamento do modelo com macho sobre a caixa base

3.3.1.2.7 Posicionamento dos canais de alimentação

Após o assentamento do modelo com macho sobre a caixa base, foi feito o posicionamento da caixa intermediária, conforme ilustrado na Figura 56, seguido do

posicionamento dos canais de distribuição e ataque, reguladores de pressão e canais de descida, formando duas frentes de vazamento dispostas diagonalmente. A areia socada ao redor dos sistemas de alimentação para fixá-los na posição já estabelecida, foi completada e firmemente socada até o nível superior da caixa intermediária, seguido de nivelamento e retirada do excesso de areia, de acordo com a ilustração da Figura 57.



Figura 56 – Preparação para colocação dos canais
Figura 57 - Posicionamento dos canais de alimentação

3.3.1.2.8 Preenchimento e compactação da areia de moldagem sobre o modelo

A etapa de preenchimento e compactação da areia sobre a superfície do modelo na caixa foi feita de forma vigorosa com bastões de aço. O processo é manual, realizado com pressão uniforme em todas as regiões da caixa e ao redor do modelo, para que se obtivesse a compactação mais uniforme possível, conforme ilustra a Figura 58.



Figura 58 - Preenchimento e Compactação da Areia de Moldagem

3.3.1.2.9 Posicionamento dos alimentadores

Finalizado a preparação da caixa intermediária conforme ilustra a Figura 59 com modelo e canais posicionados foi feito o assentamento da caixa de cobertura (superior) conforme a Figura 60 e posicionados as travas e ganchos para fixação do bolo de areia. Os modelos de alimentadores foram posicionados sobre a superfície externa do modelo, na região dos furos de fixação e do eixo da roda.

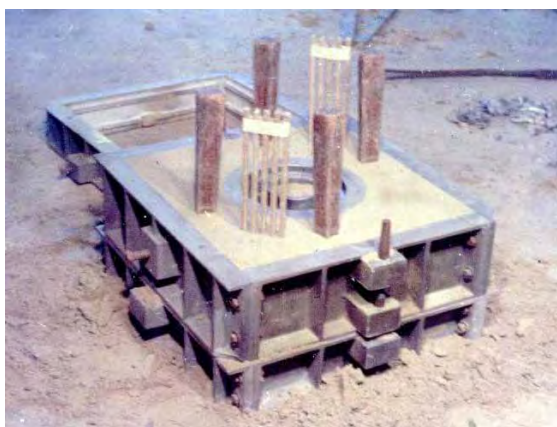


Figura 59 – Finalização da caixa intermediária



Figura 60 - Assentamento da terceira caixa

A areia de moldagem foi compactada na base dos alimentadores para fixá-los, como mostra a Figura 61, e a caixa foi preenchida com o restante da areia e fortemente compactada. Os excessos de areia sobre a superfície foram retirados até o completo nivelamento.



Figura 61 – Retirada dos alimentadores e canais.

3.3.1.2.10 Abertura da caixa e retirada do modelo, canais de alimentação e massalotes

Com a areia compactada e nivelada, conforme Figura 62(a), na superfície caixa superior de moldagem, os modelos dos canais de descida, reguladores de pressão e alimentadores foram cuidadosamente retirados, para em seguida iniciar a abertura das caixas e retirar do modelo, conforme pode ser visto na Figura 62(b). Os grãos desagregados durante a abertura foram removidos com leve jato de ar e pequenos defeitos eram reparados quando necessário. O alargamento dos alimentadores era processado para proporcionar maior volume de alimentação e os resfriadores pintados com uma tinta a base de grafite, ácido bórico, álcool e água, com a finalidade de proteger a superfície do resfriador e facilitar o processo de solidificação da peça fundida conforme ilustra a Figura 62(c).

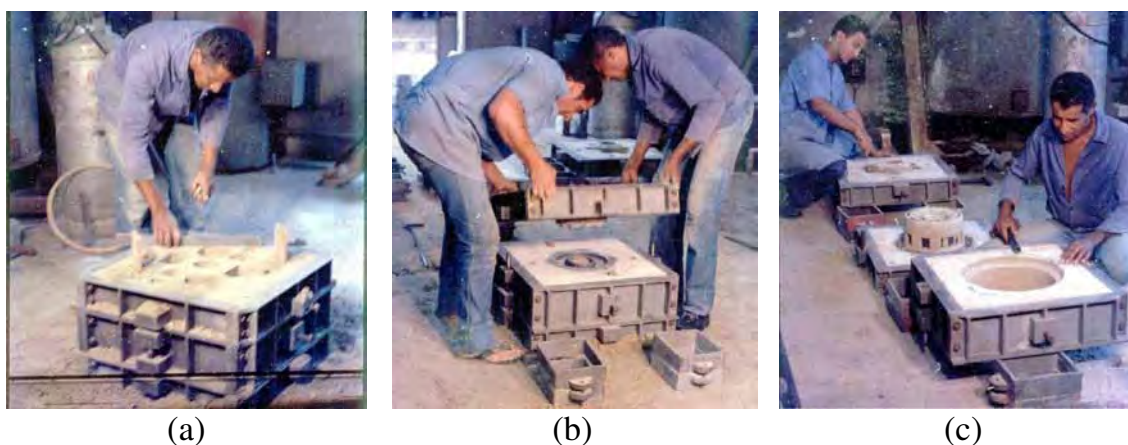


Figura 62 – Sequência de operações para retirada do modelo – (a) Retirada de excessos de areia, (b) Abertura da caixa para retirada do modelo, (c) Reparos e acabamentos do molde.

3.3.1.2.11 Aquecimento dos resfriadores

Após a abertura das caixas e verificação do acabamento interior dos moldes para pequenas correções foi iniciado o aquecimento dos resfriadores com queimadores a gás, através de uma tocha fina dirigida à superfície desses na região do flange, das chavetas e fixação com a finalidade de retirar a umidade e direcionar a velocidade de solidificação. O controle da temperatura na superfície dos resfriadores foi feito com

um medidor de temperatura digital, visor em cristal líquido, marca TECHNTERM, modelo 9500, escala fina: -70°C a 200°C , precisão: $0,1^{\circ}\text{C}$, sensor de superfície específico para a atividade “chromel-alumel”, modelo 30, usado para avaliar as temperaturas até o completo encharcamento das superfícies: flange entre 70°C a 75°C , chavetas entre 72°C a 77°C e fixação entre 74°C a 78°C , como mostra a Figura 63.



Figura 63 – Aquecimento dos resfriadores

3.3.1.2.12 Fechamento das caixas e assentamento das bacias de vazamento

Finalizada a operação de aquecimento e encharcamento dos resfriadores na faixa de temperatura descrita foi feita a limpeza da caixa base com jato de ar para a retirada de resíduos de moldagem e processado o rápido fechamento. Em seguida foi feito o assentamento da bacia de vazamento e alinhamento dos furos do canal de descida, das caixas moldagem e da bacia de vazamento, de modo a proporcionar um escoamento perfeito do metal fundido durante a operação de vazamento.



Figura 64 – Preparação das bacias de vazamento

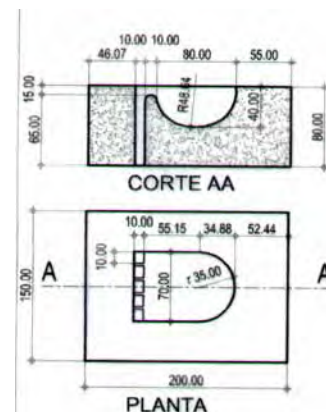


Figura 65 – Corte da bacia de vazamento.

3.3.1.3 Cálculo da carga metálica

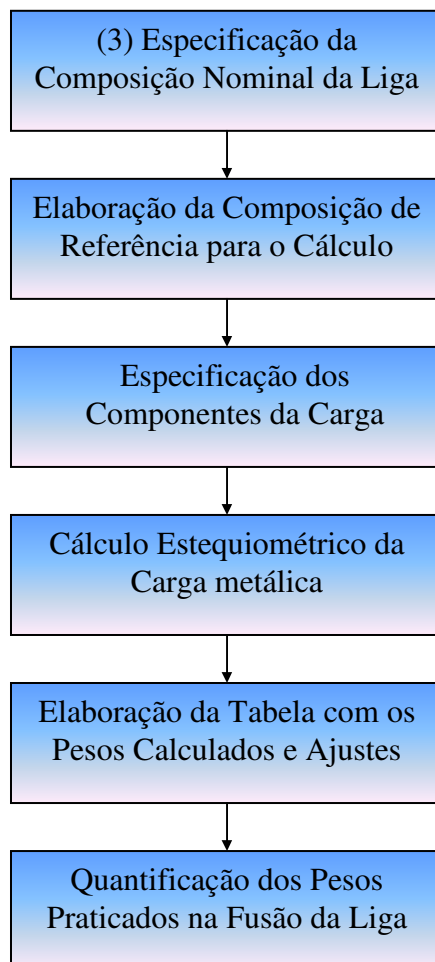


Figura 66 – Detalhamento do Processo de Cálculo de Carga

O cálculo da carga metálica da liga - Magnésio AZ91C, foi elaborado dentro de uma seqüência de operações, como mostra a Figura 66, com a finalidade de obter uma liga cuja composição química atendesse os padrões estabelecidos na ASTM - STANDARD SPECIFICATION FOR MAGNESIUM, B80-90, 1990, e a especificação estabelecida no projeto de desenvolvimento do semicubo do C-115 “Buffalo”. A aplicação da metodologia do cálculo estequiométrico nas operações foi realizada dentro de uma seqüência lógica considerando as perdas preferenciais por oxidação de alguns elementos da composição, os ajustes para compensar tais perdas e o equilíbrio da carga através do balanço total da composição química.

3.3.1.3.1 Especificação da composição nominal da liga

A especificação da composição nominal da Liga AZ91C mostrado na Tabela 21 foi feita tomando como referência padrão estabelecido pela ASTM (STANDARD SPECIFICATION FOR MAGNESIUM, 1990).

Tabela 21 – Composição Nominal da Liga AZ91C

LIGA AZ91C	Elementos de Composição (%)							
	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	outros
	balanço	8,7	0,7	0,24	0,3 máx.	0,10 máx.	0,01 máx.	0,3 máx.

3.3.1.3.2 Elaboração da composição de referência para o cálculo de carga da liga AZ91C

Para estabelecer a composição de referência usada no cálculo de carga da liga AZ91C, foi observado através de fusões experimentais, tendo como parâmetro a composição nominal da Tabela 21, que alguns elementos de liga sofriam perdas por oxidação, concluindo-se que os valores obtidos e estabelecidos para composição de referência mostrada na Tabela 22 eram apropriados para aplicação no cálculo da folha de carga final sem causar diferenças consideráveis na composição final da liga.

Tabela 22 - Composição de Referência para o cálculo de carga

LIGA AZ91C	Elementos de Composição (%)							
	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	outros
	90,14	8,9	0,7	0,2	-	-	-	-

3.3.1.3.3 Especificação dos componentes da carga

Os componentes para o cálculo de carga especificados pelo fornecedor através da análise química foram submetidos a nova análise química no Laboratório Químico da Divisão de Materiais – AMR-IAE-CTA sendo estes valores obtidos mostrados na

Tabela 23, tomados como referencia na elaboração do cálculo de carga final da liga AZ91C.

Tabela 23 – Especificação da Composição dos Componentes da Carga.

Materiais Usados	Elementos e Composição (%)										
	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Ti	Cr	Sn
Magnésio 99,947 %	99,947	<0,01	0,005	0,002	<0,01	<0,001	0,003	0,001	<0,01	<0,01	<0,01
Alumínio 99,84 %	<0,001	99,84	<0,004	0,002	<0,01	<0,001	<0,001	0,12	<0,01	<0,001	0,01
Zinco 99,959 %	<0,01	<0,01	99,959	~	<0,01	~	<0,001	0,001	<0,01	~	~
Al-Mn 10%	0,04	89,406	0,01	9,38	0,28	0,04	0,004	0,37	0,02	~	~

Na prática, a elaboração da Tabela de Carga para a preparação da liga final exige uma certa tolerância para os percentuais dos elementos componentes individuais.

3.3.1.3.4 Cálculo estequiométrico da carga metálica

A referência em peso usado para o cálculo da carga foi de 60 kg de metal por corrida, como mostra a Tabela 24, onde são apresentadas as quantidades calculadas dos pesos de cada elemento considerando os percentuais da composição de cada um deles.

3.3.1.3.5 Elaboração da tabela com os pesos calculados e ajustes

A Tabela 24 mostra a participação em peso de cada elemento químico especificado na composição da carga metálica, cujo valor teórico alcançado de 59999,85 g em peso, assegura que o cálculo estequiométrico executado com base em 60000 g é confiável.

Tabela 24 – Folha de Carga Final.

Elementos de Composição da Liga		Composição da Carga em Peso (g)				
		Mg – 99,947%	Al-99,84%	Zn-99,959%	Al-Mn-10%	Σ (g)
		54112,10	4247,9	420,17	1219,83	60000
Mg		54083,42	0,042	0,042	0,42	54083,98
Al		5,40	4241,1	0,042	1090,60	5337,17
Zn		2,70	0,17	419,99	0,12	422,98
Mn		1,08	0,085	-	119,90	121,06
Si		5,40	0,42	0,042	3,41	9,27
Cu		0,54	0,042	~	0,48	1,06
Ni		1,62	0,042	0,004	0,048	1,71
Outros	Fe	0,54	5,09	0,004	4,51	10,14
	Ti	5,40	0,42	0,042	1,24	6,10
	Cr	0,54	0,042	~	~	0,58
	Sn	5,40	0,42	~	~	5,82
Σ (g)		54112,04	4247,87	420,16	1219,78	59999,85
%		99,999	99,999	99,999	99,999	99,9999

3.3.1.3.6 Quantificação dos pesos praticados na fusão da liga

Não é necessário e significativo praticar o exato cálculo de carga, visto que o a melhor referência é a análise química dos componentes, que não é exatamente 100%, mesmo pondo de lado as imprecisões das pesagens.

Portanto, para a pesagem de cada componente da carga foi praticado em gramas o valor inteiro mais próximo do calculado, utilizando-se balanças de precisão, calibradas, e com divisão de 10 gramas.

3.3.1.4 Fusão da liga (4)

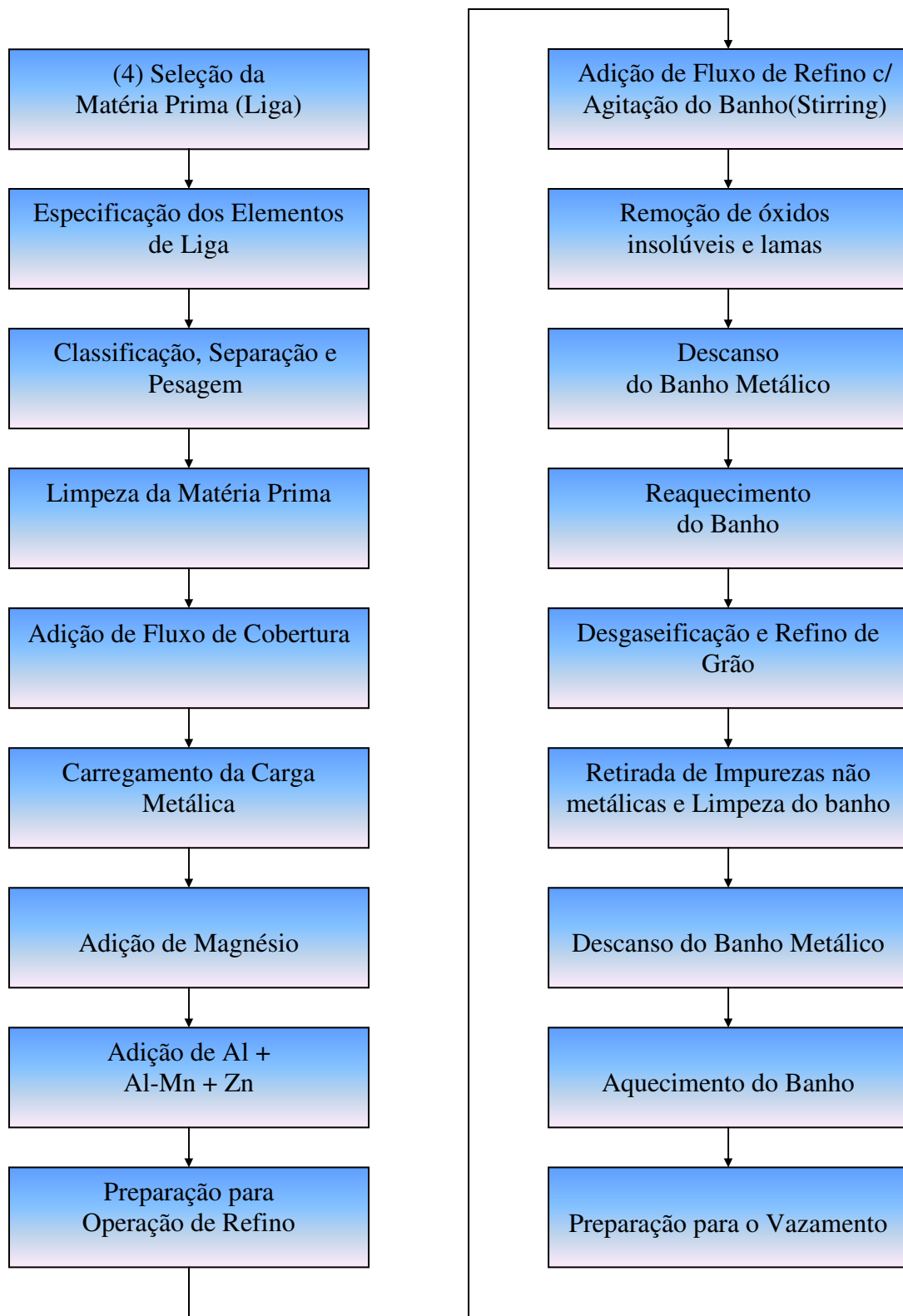


Figura 67 – Detalhamento do Processo de Fusão

3.3.1.4.1 Materiais empregados na fusão da liga

- Magnésio, Grau de Pureza – 99,947%.
- Alumínio, Grau de Pureza – 99,84%.
- Zinco, Grau de Pureza – 99,959%.
- Liga Mãe de Alumínio-Manganês, Grau de Pureza - 10%.
- Cadinho em Aço Baixo Carbono, baixo teor de Cobre e Níquel - Capacidade - 60 kg.
- Pá Metálica em Aço Baixo Carbono - Retirada de Fluxo

3.3.1.4.2 Materiais empregados na proteção, desgaseificação e refino do banho metálico.

- Fluxo de Proteção do Banho – Magnesal-M1
- Fluxo de Refino do Banho – Magnesal-M55
- Pastilhas de Hexacloretano – Pastilhas com 25g

3.3.1.4.3 Materiais empregados no vazamento da peça

- Painelas de Vazamento em aço baixo carbono, Bico de Chaleira - Capacidade 12 a 15 kg de metal.
- Escumadeiras e Conchas de aço baixo carbono – Limpeza e Escumagem
- Enxofre em pó – malha # 250

3.3.1.4.4 Equipamentos e ferramentas empregados no processo de fusão

O Forno de Cadinho, tipo fixo, utilizado no processo de fundição da liga de magnésio AZ91C, tinha a forma de um depósito circular, semi-enterrado, revestido externamente com chapa de aço e internamente por tijolos refratários, como mostra a Figura 68. Seu interior consistia, essencialmente, de uma câmara de aquecimento cilíndrica, de refratário, onde era assentado um cadinho removível com capacidade para 60 kg de magnésio.

O calor fornecido era produzido por um queimador a óleo diesel, e tinha como acessórios os seguintes componentes necessários: um depósito de óleo, bomba de óleo, compressor de ar e um regulador de entrada de óleo e de ar.

O sistema de aquecimento processava a mistura ar-óleo pulverizado e o calor gerado sob ação da chama direta sobre a parede do cadinho na câmara de combustão fundia a carga metálica. Os gases produzidos na câmara de combustão eram escoados por uma abertura circular na base do forno através de um duto de material refratário e se exauria na atmosfera.



Figura 68 – Forno a óleo combustível com cadinho removível.

Na fusão da liga AZ91C foi usado um cadinho de aço baixo carbono - SAE 1020 com teor de cobre e níquel menor que 0,1% e 0,01%, respectivamente, para evitar a contaminação do banho metálico, revestido externamente por uma camada anticorrosiva de granulação grosseira. Antes do primeiro uso era banhado previamente com uma mistura de óleo diesel e grafite e submetido ao aquecimento, para aumentar a resistência e a vida útil da camada protetora. De acordo com o projeto do forno o cadinho apresentava seguintes dimensões: diâmetro da boca - 350mm; profundidade 500mm; espessura da parede 10mm.

As ferramentas usadas no processo de fusão da liga AZ91C foram feitas de aço de baixo carbono SAE 1020 para as operações de adição de fluxo no banho, escumagem de sais e escorificação de impurezas, refino e remoção de metal para vazamento, para auxiliar na preparação, fusão, remoção, adição e vazamento do banho metálico, como mostra as Figuras 23, 24, 26 e 69.



Figura 69 – Ferramentas (painéis, escumadeiras, conchas, sino) usadas na fusão do Magnésio.

- ◆ Painel de Vazamento – recipiente cilíndrico feito em chapa aço baixo carbono SAE 1020 com teor de cobre e níquel desprezíveis, soldado a uma haste com manete de basculamento, como mostra as Figuras 23 e 69, podendo conter uma aba em chapa fina situada a um terço abaixo da borda superior traseira da panela para remoção da camada de fluxo, drosses, impurezas etc, que sobrenada o metal e um bico de vazamento para orientar o escoamento do metal no molde. A superfície da panela poderá ser coberta por uma tampa protetora semiesférica para evitar oxidação e derramamento do metal. Capacidade: 10kg a 12 kg de metal líquido.

- ◆ Painel de Transferência – Recipiente cilíndrico, como mostra a Figura 24, confeccionado em carbono SAE 1020 com teor de cobre e níquel desprezíveis, soldado a uma haste com um manete de basculamento, podendo conter uma aba de escumagem em chapa fina situada a um terço abaixo da borda superior traseira para remoção da camada de fluxo, drosses, impurezas etc, que sobrenada o metal e um bico de vazamento para orientar o escoamento do metal no molde. Sem proteção na parte superior, com bico de vazamento no formato “bico de pato”, usado para enchimento da panela de vazamento. Capacidade: de 3 kg a 5 kg de metal líquido,.

- ◆ Escumadeira – Ferramenta manual, formato circular, perfurada com diâmetro de 150 mm e furos de 8 mm de diâmetro, uniformemente distribuídos, feita em chapa fina de aço carbono SAE 1020 com teor de cobre e níquel desprezíveis, soldada a uma haste com manete de apoio, como mostra as Figuras 24 e 69, usada para escumagem e

remoção de fluxos, escórias, drosses, lamas, que sobrenadam o metal líquido ou estão em suspensão no interior do banho, ou sedimentadas no fundo do cadinho.

- ◆ Colher para Remoção de Escória e Lama do Fluxo – Ferramenta manual com formato circular, diâmetro de 150 mm, confeccionada em aço baixo carbono SAE 1020 com teor de cobre e níquel desprezíveis, soldada a uma haste de fixação, como mostra a Figura 24, usada para remoção de lamas, de fluxo, escórias, borras, etc., que sobrenadam na superfície do metal líquido.

- ◆ Concha para Retirada de Amostra – recipiente côncavo, formato em meia lua, feito em aço baixo carbono SAE 1020 com teor de cobre e níquel desprezíveis, diâmetro de 100 mm, profundidade de 80 mm, soldada a uma haste de fixação, como mostra as Figuras 24 e 69, usado para a retirada de amostra de corpo de prova para ensaios metalográficos e químicos.

- ◆ Sino para Desgaseificação e Refino de Grão – Recipiente cilíndrico com tampa de fechamento, totalmente perfurado, diâmetro interno: 90mm, profundidade: 110 mm, feito em aço baixo carbono SAE 1020 com teor de cobre e níquel desprezíveis, soldado a uma haste, como mostra na Figura 24, usado para adição por imersão do desgaseificante e/ou refinador de grão no banho de metal líquido durante as operações de desgaseificação e refino de grão.

3.3.1.4.5 Seleção da matéria prima (Liga)

A matéria prima selecionada para a fusão da liga AZ91C foi especificada atendendo a norma Standard Specification for Magnesium Alloys in Ingot Form for Sand Castings, Permanent Mold Castings, and Die Castings - ASTM B93/B93M-05 para obtenção de fundidas de magnésio de uso aeronáutico, como: rodas, freios e alojamentos de freio de aeronaves em moldes de areia e moldes permanentes.

Os materiais selecionados apresentavam elevado grau de pureza para conferir as melhores propriedades físico-químicas e atender os requisitos de aplicação aeronáutica.

O Magnésio-99,947%, Alumínio-99,84%, Zinco-99,959% e Alumínio-Manganês-10% eram fornecidos dentro de critério de qualidade com relatório de procedência, processo de obtenção do fabricante e análise química do lote e após

recebimento eram novamente analisado no Laboratório Químico da AMR-IAE-CTA, para certificar a confiabilidade da matéria prima fornecida.

3.3.1.4.6 Especificação dos elementos de liga

Os elementos químicos de cada componente da carga, especificados na composição química da liga AZ91C, após o relatório de análises químicas realizadas no Laboratório Químico da AMR-IAE-CTA, que qualifica a matéria prima para aplicação no cálculo da carga metálica, foram avaliados dentro dos padrões estabelecidos na norma Standard Specification for Magnesium Alloys in Ingot Form for Sand Castings, Permanent Mold Castings, and Die Castings - ASTM B93/B93M-05.

3.3.1.4.7 Classificação, separação e pesagem

A matéria prima, em forma de lingotes, usada no carregamento do forno era retirada do lote e disposta em pilhas separadas com identificação e conduzida para pesagem em balança mecânica (analógica), calibrada, capacidade máxima de 150 kg; e divisão de 10 g para pesagem das frações menores componentes da carga metálica.

3.3.1.4.8 Limpeza da matéria prima

A matéria prima usada na fusão da liga AZ91C era limpa com escova de aço para retirada de resíduos sólidos aderidos à superfície do lingote.

A remoção de resíduos líquidos ou semipastosos, como graxas, óleos, etc era feita com desengraxante e o material conduzido para uma pré-secagem em estufa. Depois, removido para a borda da soleira do forno, onde recebia o aquecimento e a secagem total, até o momento da adição no interior do cadinho.

3.3.1.4.9 Adição de fluxo de cobertura

Após a limpeza do cadinho era iniciado o aquecimento do forno para remoção de quaisquer vestígios de umidade. Em seguida era adicionada uma camada de fluxo de proteção - Magnesal M-1, composição: CaCl_2 -42%; NaCl -27%; KCl -18%; MgCl_2 -

11%; MgO-2%, na soleira do forno, para impedir a oxidação e formar uma camada líquida de alta fluidez sobre a superfície do metal em fusão.

3.3.1.4.10 Carregamento da carga metálica

Adição da carga de Magnésio era feita na forma de pedaços. A ocorrência rompimentos da camada do fluxo protetor na superfície do banho, durante a fusão era continuamente inibida com adição de pequena quantidade de fluxo para evitar a oxidação intensiva do metal durante o processo de fusão.

3.3.1.4.11 Adição de magnésio

Com o forno aquecido, o magnésio era adicionado no fundo do cadinho, sendo continuamente protegido até a sua completa fusão e aquecimento à temperatura aproximada de 720 °C.

3.3.1.4.12 Adição de Alumínio, Alumínio-Manganês e Zinco

Alcançada a temperatura de 720°C era feito a adição dos elementos de liga: Alumínio puro, e após homogeneização, a adição do Al-Mn-10%. Finalmente a adição de zinco puro na temperatura de 690 °C.

3.3.1.4.13 Preparação para operação de refino

Após a solubilização do banho elevou-se a temperatura da carga metálica para 730 °C, sendo as ferramentas usadas na operação de refino aquecidas previamente na borda do forno e por imersão no banho. Essas foram previamente borrifadas com uma camada de fluxo de refino para proteger região de imersão, e em seguida mergulha no interior da massa líquida para aquecimento.

3.3.1.4.14 Adição de fluxo de refino com agitação do banho (Stirring)

A operação de refino era iniciada com a deposição de uma camada de fluxo de refino específico para o tratamento, o fundente Magnesal M-55, composto de: MgCl₂-34%, CaCl₂-15%; NaCl-9,5%; MgO-10,5%; KCl-13%; CaF₂-18%, sobre a superfície

do banho, através de um dispositivo metálico em forma de serpentina, manipulado vigorosamente, através de movimentos circulares contínuos, agitando a massa líquida. Durante o processo o fluxo era adicionado continuamente sobre a superfície do banho para a precipitação das partículas em suspensão na superfície do banho. O tempo estimado para o processo, considerando o volume de carga fundida, variava de 10 a 13 minutos, necessário para completa imersão e sedimentação de partículas não metálicas, impurezas e sais de cloretos em suspensão na superfície e interior da massa líquida.

3.3.1.4.15 Remoção de óxidos insolúveis e lamas

Após a operação de refino, executado sob total agitação do banho era iniciado a remoção com pás removedoras, escumadeiras, dos óxidos, escórias, lamas de fluxo, etc, que ficaram sedimentadas no fundo do cadinho. Por ser material mais denso o arraste era feito com as ferramentas até a superfície do banho e retirados da massa líquida para um depósito de escória posicionado ao lado do forno.

3.3.1.4.16 Descanso do banho metálico

Finalizado a retirada de drosses, óxidos, lamas, etc, o metal líquido era deixado em repouso por um tempo determinado, aproximadamente 20 minutos, para que a operação de refino fosse totalmente concluída com sedimentação de partículas restantes que se encontravam suspensas no interior do líquido sob o efeito da dinâmica de agitação do banho.

3.3.1.4.17 reaquecimento do banho metálico

Após o período de descanso do banho metálico o forno era religado à temperatura 707°C a 715°C . O metal era reaquecido sob a proteção de uma fina camada de fluxo protetor até atingir a temperatura entre 780°C e 785°C , considerada ideal para o início da desgaseificação .

3.3.1.4.18 Desgaseificação e refino de grão

A operação de desgaseificação e refino do grão era iniciada após o reaquecimento da carga metálica. Quando atingido a temperatura entre 780°C e 785°C

o forno era desligado e iniciado o processo de adição do agente desgaseificador, Hexacloretano - C_2Cl_6 , na ordem de 0,13% do peso da carga. O equipamento usado na desgaseificação e refino era um sino inoculador de aço baixo carbono SAE 1020 com teor de cobre e níquel desprezíveis, imerso no fundo do cadinho até o final do borbulhamento, caracterizando o término da operação. A reação era de natureza exotérmica, elevando a temperatura do banho aproximadamente de 20°C a 25°C.

3.3.1.4.19 Retirada de impurezas não metálicas e limpeza do banho

As impurezas decorrentes do processo de desgaseificação na forma de óxidos pesados, drosses (escórias) que sobrenadavam o banho foram removidas com uma colher para remoção de escória para retirada das impurezas presentes na superfície do banho. Uma leve camada de fluxo protetor era adicionada formando uma película protetora sobre a superfície do metal líquido deixando-o descansar.

3.3.1.4.20 Descanso do banho metálico

Após a desgaseificação e refino do grão, o forno era desligado e o banho deixado repousar por aproximadamente 15 minutos para a acalmagem do metal líquido. Após o descanso, o aquecimento era retomado e a temperatura elevada até o patamar ideal de vazamento sob o controle de um medidor de temperatura específico para atividade¹⁶.

3.3.1.4.21 Aquecimento final do banho metálico

Com o descanso, o banho metálico perde calor por condução, radiação, convecção, e ao ser reaquecido novamente recebe a carga térmica gerada pelo forno até atingir a temperatura de encharcamento que é controlada por medições periódicas com um pirômetro digital, portátil. Ao atingir a faixa de temperatura entre 780°C e 785°C, observava-se que o banho estava pronto para o vazamento dentro da temperatura ideal para receber as panelas, conforme a temperatura pré-estabelecida em processo.

¹⁶ Durante todo o processo o controle de temperatura era feito com um pirômetro digital, portátil, visor de cristal líquido, marca TECHNOTERM, através de um sensor de cromel-alumel (NiCr-NiAl) revestido com tubo de aço especial, faixa de trabalho de - 70 °C a 1200 °C, tempo de resposta - igual a 0,5 seg e precisão mais ou menos 0,3% da leitura.

3.3.1.4.22 Preparação para o vazamento

Após a fusão e procedimentos de tratamento do banho eram iniciados a etapa de aquecimento do metal líquido e sua preparação para o vazamento. Algumas precauções foram tomadas a fim de evitar a oxidação e o arraste de drosses para o interior da cavidade do molde.

Embora as ligas de magnésio não entrem em combustão abaixo de 800 °C estas são protegidas na panela com leve borrifamento de enxofre em pó sobre a superfície do banho. O uso da panela com bico de chaleira facilita o vazamento do metal isento de drosses. Como as drosses permanecem no fundo da panela, costuma-se vaziar somente 2/3 do metal líquido para evitar contaminação da peça.

O procedimento usado no vazamento dos semicubos era executado, como mostra a Figura 70, com panelas através de duas frentes de vazamento, na temperatura de 760 °C a 762 °C para o semicubo com chaveira, e 755 °C a 760 °C para o semicubo sem chaveira, usando um pirômetro digital para conferir as temperaturas antes e durante o vazamento.

As panelas eram confeccionadas em chapa de aço SAE 1020 com teores desprezíveis de cobre e níquel, formato cilíndrico, espessura de 3mm, bico de chaleira, tampa tipo “meia lua”, formato em concha, soldada sobre a extremidade superior para proteção do metal líquido, e a uma haste comprida com anel na extremidade para manipular o vazamento, conforme mostrado nas Figuras 23, 70 e 71.



Figura 70 – Mostra da técnica de vazamento do semicubo através de duas frentes de vazamento.

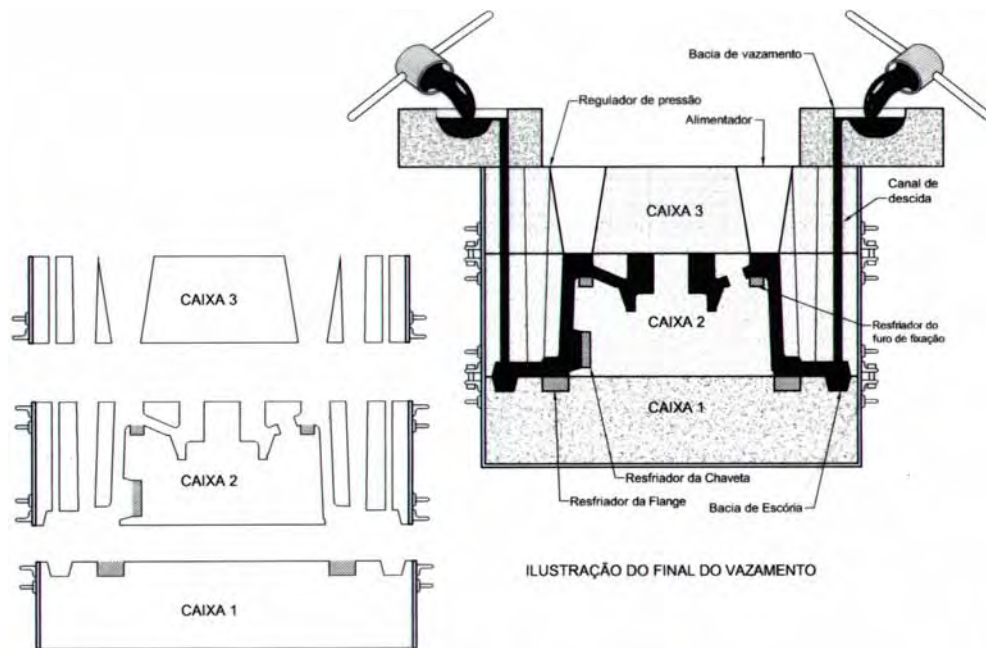


Figura 71 – Técnica de vazamento do semicubo através de duas frentes.

3.3.1.5 Detalhamento do controle de qualidade (5)

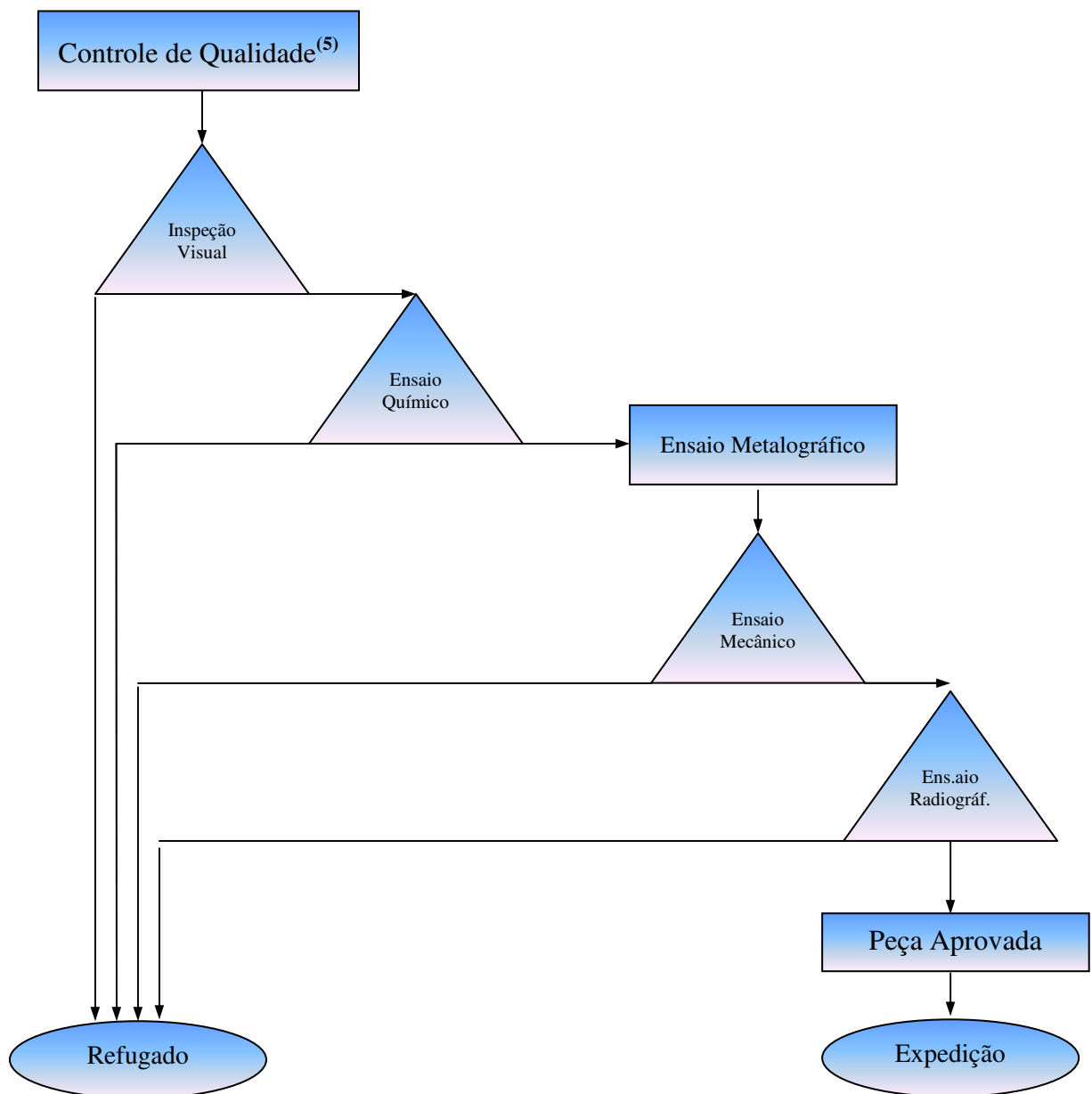


Figura 72 – Detalhamento do Controle de Qualidade

3.3.1.5.1 Materiais empregados na obtenção de corpos de prova para análises químicas e ensaios mecânicos

- Moldes de Grafite – Vazamento do Corpo de Prova para Análise Química
- Modelo dos Corpos de Prova (Ensaio Mecânico)- Liga de Alumínio AA-356
- Modelos de canais de Alimentação (Corpos de Prova) - Liga de Alumínio AA-356

3.3.1.5.2 Materiais empregados na desmoldagem do bruto de solidificação

- Bastão de aço para quebra do molde
- Colher de Pedreiro – Retirada da Areia do Molde
- Escova de Aço – Limpeza do Fundido

3.3.1.5.3 Materiais empregados nas análises e ensaios radiográficos

- Ecran de Chumbo dimensões: 4 ½” x 17” x 0,005” e 3 ½” x 17” x 0,005”
- Ecran de Chumbo dimensões: 4 ½” x 17” x 0,010” e 3 ½” x 17” x 0,010”
- Colgadura
- Identificador de Qualidade de Imagem - IQI
- Filme Kodak Industrex AX-5 Classe 2 dimensões :4 ½” x 17” e 3 ½” x 17”
- Chassis para Filme Radiográfico dimensões: 4 ½” x 17” e 3 ½” x 17”
- Revelador
- Fixador

3.3.1.5.4 Inspeção visual

Após o vazamento, solidificação e resfriamento os semicubos eram desmoldados e submetidos a inspeção visual para verificar a existência de defeitos superficiais, como: trincas, bolhas, sopros, etc. que viessem comprometer a qualidade dos fundidos.

O padrão aeronáutico exige um rígido controle de qualidade, visto que alguns componentes como rodas e freios de uso aeronáuticos que trabalham sob condições severas de pressão, vibração e temperatura, devido a sua aplicação são controlados por

normas e padrões específicos estabelecidos de acordo com a norma Aerospace Standard AS 586 da Society of Automotive Engineers - SAE.

As inspeções visuais de rotina como: verificação de trincas a quente, bolhas superficiais, defeitos de solidificação, penetração de materiais estranhos, falhas de alimentação, afloramento de fluxo e variações dimensionais são defeitos que dependendo da gravidade podem comprometer a qualidade do fundido.

3.3.1.5.5 Ensaio químico

Após a fusão de cada corrida, o corpo de prova era retirado e conduzido ao Laboratório de Análise Química da Divisão de Materiais (AMR) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do Centro Técnico Aeroespacial (CTA), para a análise quantitativa dos elementos de composição da liga de magnésio AZ91C a ser do sistema de alimentação (ASTM E35-88) e os demais por absorção atômica utilizando-se um espectrofotômetro de absorção atômica, marca VARIAN, modelo SPECTR AA-20 PLUS, NI 27963.



Figura 73 – Espectrofotômetro de Absorção Atômica.

3.3.1.5.6 Ensaio metalográfico

No desenvolvimento da liga AZ91C a análise da microestrutura é uma propriedade essencial para a caracterização da qualidade do fundido. Corpos de prova foram preparados e os exames metalográficos realizados com um microscópio marca Leica, modelo DMRXP, campo claro e escuro, luz polarizada e aumento de 25 X - 1000 X, no Laboratório Metalográfico da Divisão de Materiais (AMR), do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), do Centro Técnico Aeroespacial (CTA), de acordo com a norma ASTM E3-90. O procedimento adotado obedeceu a seqüência técnica recomendada: corte da amostra; embutimento em baquelite; lixamento sucessivo com lixa de granulação fina e pouca pressão na superfície da amostra; polimento com acabamento especular em suspensão de alumina; limpeza da superfície e ataque químico da amostra com um reagente apropriado para fundidos. Composição do reagente: etileno glicol - 60%; ácido acético - 20; ácido nítrico - 1,0% e água destilada - 19%. Tempo de imersão para identificação da fase predominante e disposição dos micro-constituintes: 5 a 15 segundos.



Figura 74 – Microscópio Óptico Leica, modelo DMRXP

3.3.1.5.7 Ensaios mecânicos

Os ensaios físicos para caracterização das propriedades mecânicas da liga AZ91C – F (como fundido), foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da AMR–IAE–CTA, com uma Máquina Universal, marca INSTRON, modelo 1332, célula de carga – 25 t, como mostra a Figura 75. Os ensaios foram realizados conforme, a norma ASTM B80–90, que estabelece os parâmetros específicos mínimos para o Limite de Resistência: 158 MPa, Limite de Escoamento (0,2% de desvio): 76 MPa e Alongamento: 2,5%.



Figura 75 - Máquina Universal, marca INSTRON, modelo 1332

Os corpos de prova, como mostra a Figura 76 usados na qualificação das propriedades mecânicas da liga AZ91C foram preparados conforme mostra as Figuras 77 (a) e (b), em moldes de areia separados da peça fundida, representando o número de semicubos fundido por corrida de acordo com as normas ASTM E 8M–95 e ASTM B 80-90, e submetidos a ensaios mecânicos.



Figura 76 – Garra da INSTRON com Corpo de Prova para Ensaio Mecânico.



(a)



(b)

Figura 77 – (a) Moldagem dos corpos de prova em moldes de areia, e (b) Corpos de prova fundidos.

A cada corrida de semicubos fundidos dois corpos de prova representativos da corrida eram moldados e fundidos separadamente, sendo um para levantar as propriedades mecânicas do bruto de solidificação e o outro para o acompanhamento da peça, conforme exigência do projeto, no tratamento subsequente – Tratamento Térmico na condição T4 – Solubilização.

3.3.1.5.8 Ensaios radiográficos

Os ensaios radiográficos para verificação das descontinuidades, (trincas, bolhas, vazios de contração, materiais mais densos, materiais menos densos e microcontrações) do fundido foram realizados no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos da AMR-IAE-CTA, com um aparelho de raios-X Marca Andrex, Modelo CMA 20. Os ensaios foram realizados conforme, as normas MIL-STD-410, MIL-STD 453 e MIL-STD-2175, que estabelecem os procedimentos e critérios de avaliação, conforme Anexo I.



Figura 78 – Aparelho de Raios-X, marca Andrex, modelo CMA20.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA AREIA DE MOLDAGEM EMPREGADA NO PROCESSO

Considerando os estudos realizados sobre areias de moldagem para ligas de magnésio e a diversidade de misturas encontradas na literatura específica (Magnesium and Magnesium Alloys, Magnesium Casting Technology, Principles of Magnesium Technology), procurou-se desenvolver uma mistura dentro das características nacionais que atendesse as necessidades do projeto. A variedade de inibidores com custo elevado dessas misturas cujas características de inibição mostraram resultados pouco satisfatórios em alguns ensaios e experimentos realizados para conter à oxidação e queima do magnésio durante uma operação vazamento do magnésio não geraram confiabilidade ao aplicá-las.

Um estudo apresentado pelo IPT, vide (Lo Ré, 1963), mostrado na Tabela 25, serviu de referência para que se fizesse um desenvolvimento experimental de uma mistura com agentes inibidores conhecidos, eficientes e mais econômicos, permitindo a obtenção de uma moldagem com baixo custo e com alto poder de inibição da reação metal-molde.

Tabela 25 - Composição apresentada no trabalho de Lo Ré, 1963.

Componentes	Composição A	Composição B
Areia Base* Módulo de Finura - 100	87,5%	88%
Argila	3,5%	4,5%
Enxofre	4,5%	1,5%
Acido Bórico	0,5%	1,5%
Glicol Dietileno	-	1,5%
Água	Variável	Variável

*Tipo de Areia: Sintética.

Os resultados obtidos com a Areia de Composição **A**, com a umidade variando na ordem de 3% a 4% e um tempo de mistura 3,5 a 14 minutos mostraram que a

umidade, se mantida na ordem de 3% e com um tempo de mistura de 14 minutos, apresentaram boas propriedades de moldabilidade e resistência do molde, consideradas satisfatórias.

- Permeabilidade – 54 AFS;
- Resistência a compressão – 0,65 Kg/cm²;
- Deformação (%) - 2,3%.

Os resultados obtidos com a Areia de Composição **B**, com a umidade variando 3% a 4% de adição de água e tempo de mistura 3,5 a 14 minutos mostraram que a umidade, se mantida na ordem 4% e um tempo de mistura de 7 minutos, os valores obtidos foram considerados satisfatórios:

- Permeabilidade: 56AFS;
- Resistência a compressão 0,35% Kg/cm²;
- Deformação (%) – 2%.

Tomando como referência este levantamento procurou-se elaborar uma composição que pudesse oferecer as melhores características de uma areia de moldagem e proporcionar através de seus ingredientes o poder de inibição requerido para as ligas de magnésio fundido em areia.

As misturas apresentadas na Tabela 26 foram submetidas ao controle das propriedades de moldagem através de ensaios de determinação das características para verificar sua aplicabilidade na elaboração do molde.

Tabela 26 - Composições experimentais elaboradas para estudo da aplicabilidade no processo de moldagem

Composição	Mistura X	Mistura Y
Areia Sintética MF –100	92,5%	87%
Bentonita Cálcica NT 25S	3,25%	5,2%
Enxofre em pó, malha 250	1,8%	4,48%
Ácido Bórico, malha 250	0,72%	0,70%
Glicol Dietileno	0,27%	0,6%
Água	Variável	Variável

Mistura X – Utilizando-se uma mistura de areia com módulo de finura 100, medido através do ensaio granulométrico, mostrado no Apêndice C, variando a umidade na ordem de 1% a 3% de água, e um tempo de mistura de 7 a 14 minutos, observou-se, através dos ensaios de permeabilidade e resistência à compressão, que os melhores resultados obtidos foram com um tempo de 9 minutos de mistura, conforme dispostos na tabela 27 e gráficos das Figuras 79 e 80 a seguir, sendo os demais tempos desprezados por apresentarem resultados cujas características de moldagem foram consideradas pouco satisfatórias.

Tabela 27 – Resultados obtidos com a Composição X

Mistura X Tempo de Mistura: 9 minutos	Umidade (%)	Resistência à Compressão (kg/cm²)	Permeabilidade (AFS)
	1,29	65,3	82
	1,36	68,4	84
		69,5	85
	1,58	62,5	78
	1,72	53,4	74

Obs: Carga do misturador: 4kg

Os ensaios executados a partir tempo de mistura otimizado em 9 minutos permitiram encontrar a umidade ótima de trabalhabilidade da mistura : 1,44% - ponto em que a umidade oferece simultaneamente a melhor resistência com a maior permeabilidade obtendo-se assim a melhor característica de moldagem.

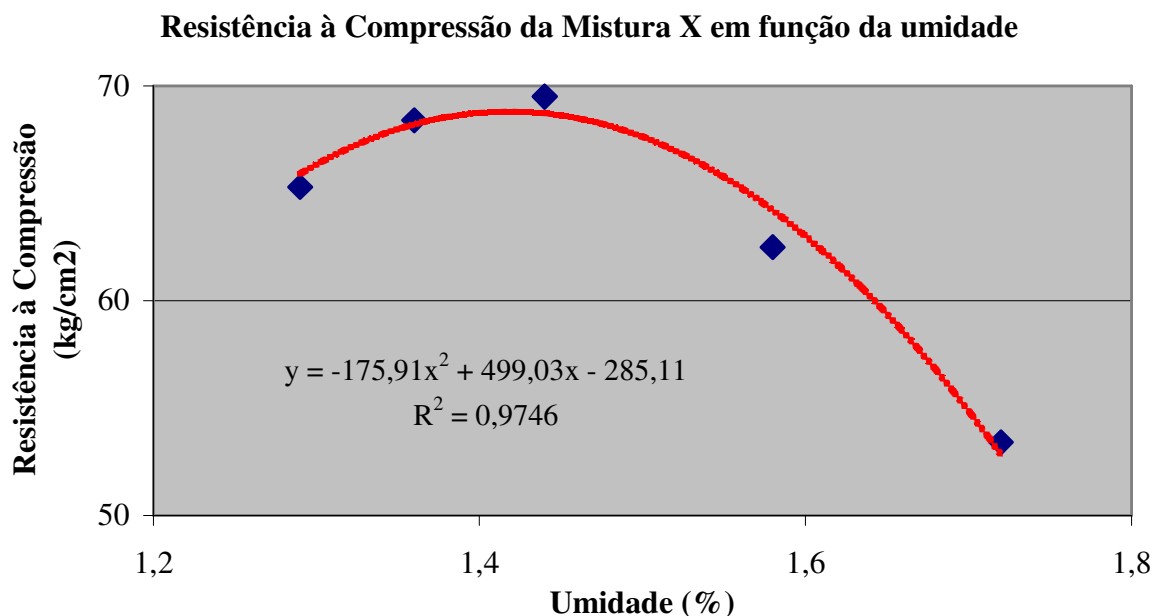


Figura 79 - Gráfico dos resultados dos ensaios de resistência à compressão obtido com a Composição X, com tempo de mistura de 9 minutos.

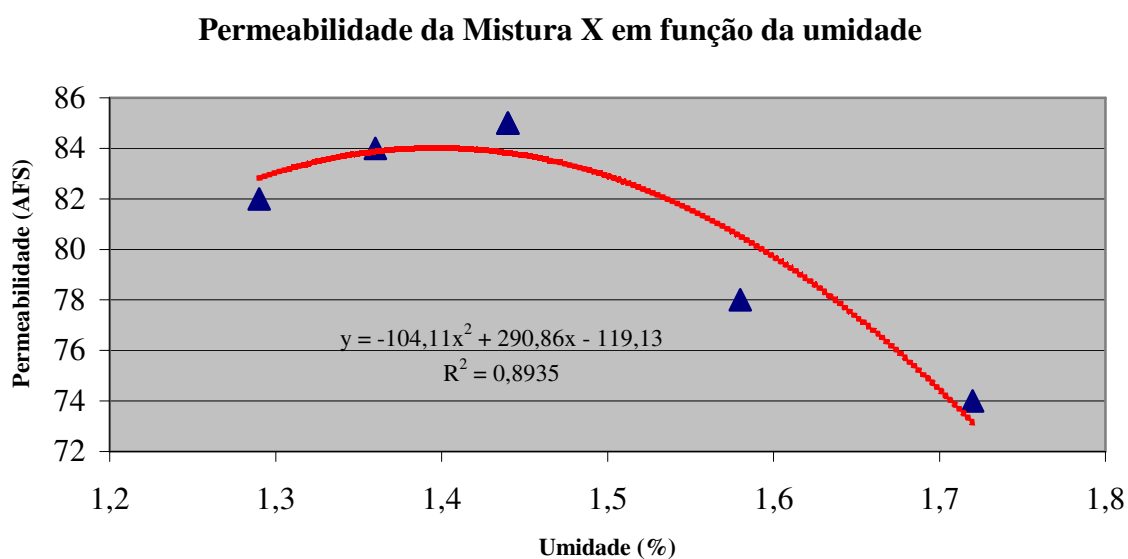


Figura 80 - Gráfico dos resultados dos ensaios de Permeabilidade obtido com a Composição X, com tempo de mistura de 9 minutos.

Mistura Y - Variando-se a umidade na ordem de 1% a 3% de água e um tempo de mistura de 7 a 14 minutos, observou-se que os melhores resultados foram obtidos com um tempo de 12 minutos de mistura e estão dispostos na tabela 28 e gráficos das

Figuras 81 e 82 a seguir, sendo os demais tempos desprezados por apresentarem resultados cujas características de moldagem foram consideradas pouco satisfatórias.

Tabela 28 - Resultados obtidos com a Composição Y

Areia Y	Umidade (%)	Resistência à Compressão (kg/cm ²)	Permeabilidade-
	Tempo de Mistura: 12 minutos	1,6	49
1,8		57	61
2,0		65	64
2,25		62	59,5
2,5		53	55

Os ensaios executados a partir tempo de mistura otimizado em 12 minutos permitiram encontrar a umidade ótima de trabalhabilidade da mistura : 2,0% - ponto em que a umidade oferece simultaneamente a melhor resistência com a maior permeabilidade obtendo-se assim a melhor característica de moldagem.

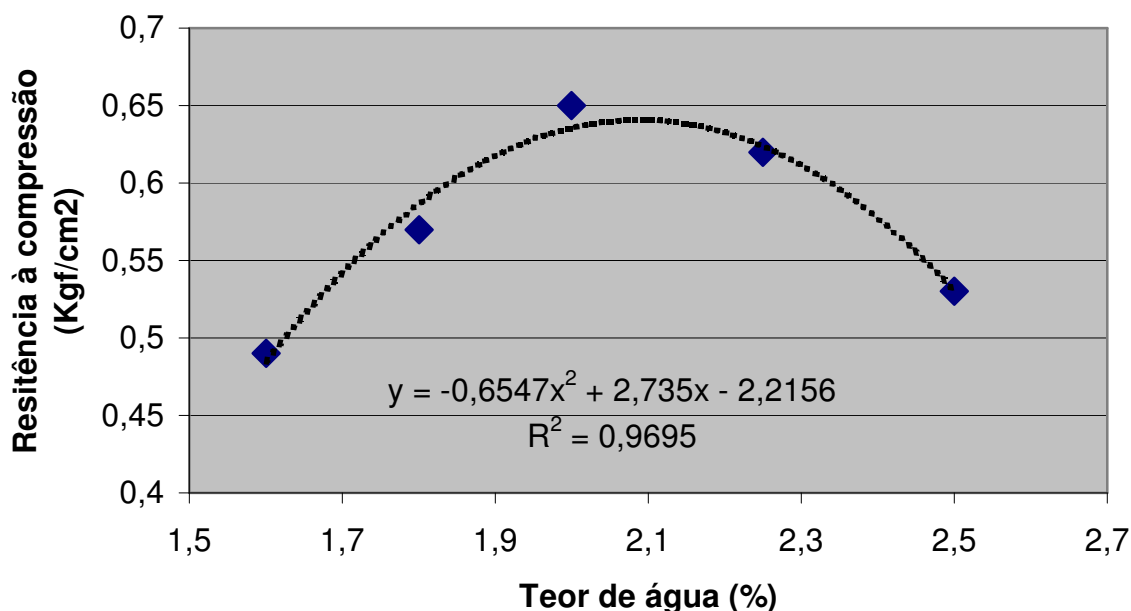


Figura 81 - Gráfico dos resultados dos ensaios de resistência à compressão obtido com a Composição Y, com tempo de mistura de 12 minutos.

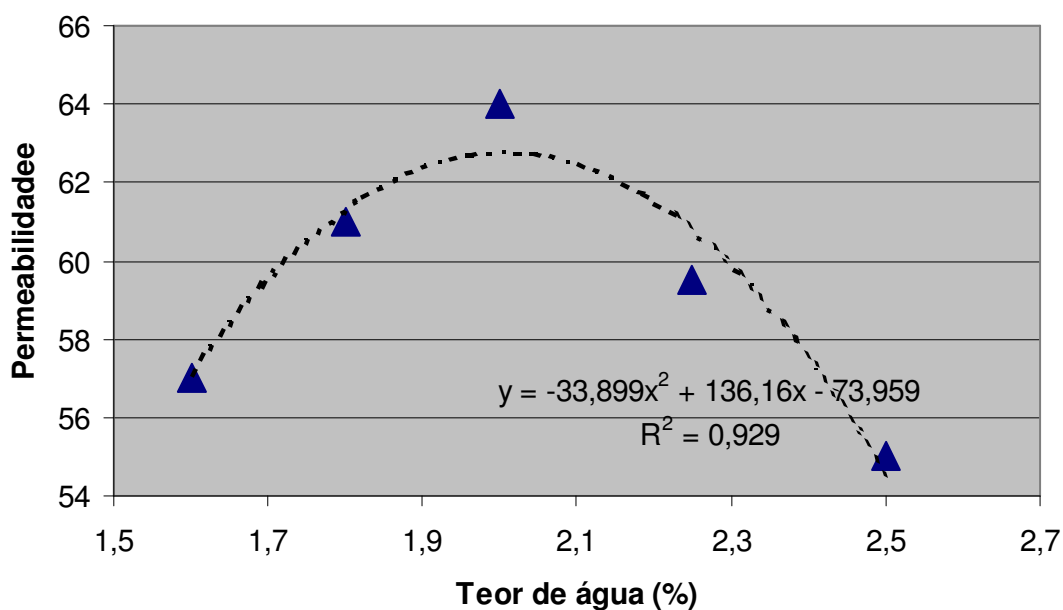


Figura 82 - Gráfico dos resultados dos ensaios de Permeabilidade obtido com a Composição Y, com tempo de mistura de 12 minutos.

A escolha da mistura mais apropriada pode ser facilmente feita através da observação do gráfico comparativo dos resultados dos ensaios de Resistência à Compressão obtidos para as misturas X e Y (Figura 83) e Gráfico comparativo dos resultados dos ensaios de Permeabilidade obtidos para as misturas X e Y (Figura 84)

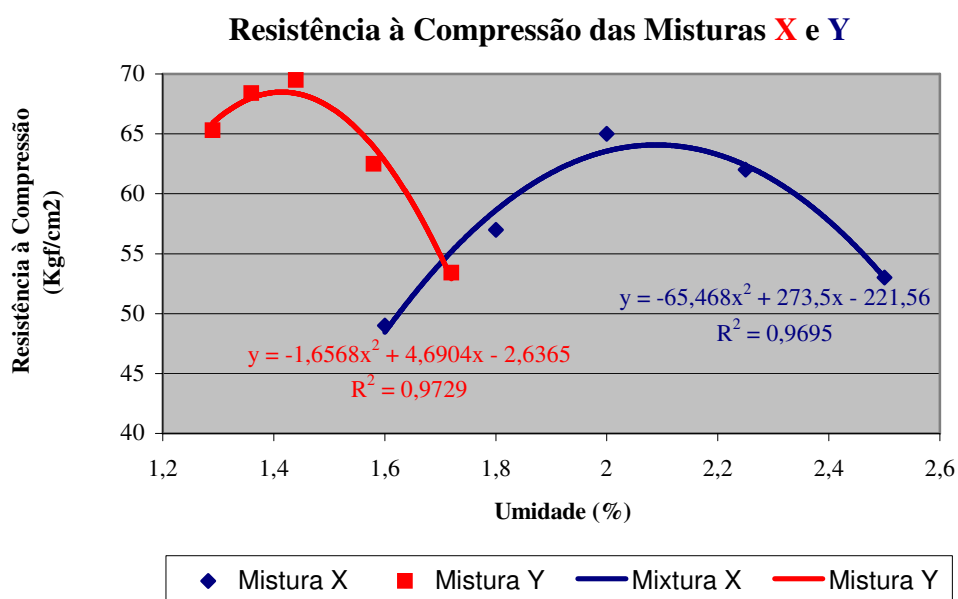


Figura 83 - Gráfico comparativo dos resultados dos ensaios de Resistência à Compressão obtidos para as misturas X e Y.

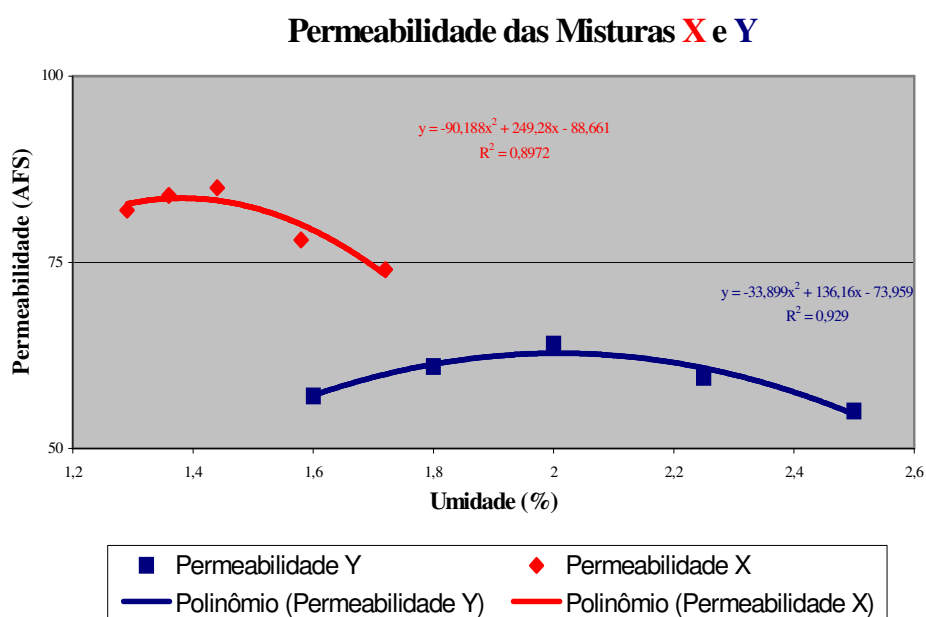


Figura 84 - Gráfico comparativo dos resultados dos ensaios de Permeabilidade obtidos para as misturas X e Y.

Dessa forma, os resultados obtidos na determinação das características das areias estudadas demonstram claramente que a Mistura X apresenta resultados de resistência à compressão e permeabilidade maiores que a Mistura Y. Quando comparados com os resultados das areias A e B estudadas por Lo Ré, constata-se uma diferença considerável nas propriedades mecânicas dessas areias, além de economia de tempo de mistura e de matéria prima empregada (Tabelas 27 e 28), configurando-se, portanto, a escolha da mistura X como a mistura ideal ao processo de moldagem dos semicubos.

4.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO CÁLCULO DE CARGA EMPREGADO NA ELABORAÇÃO DA LIGA AZ91C

Diante dos resultados obtidos comparados com a composição nominal da liga AZ91C especificada pela ASM (STANDARD SPECIFICATION FOR MAGNESIUM) conclui-se que os resultados obtidos, conforme mostrado na Tabela 29, estão dentro dos padrões preestabelecidos pela norma em vigor.

A diferença entre a Composição de Referência (Tabela 22) e a Composição Nominal (Tabela 21) é uma aproximação feita com base nas composições reais de matérias primas e da dinâmica de processo, como perda por oxidação, energia livre

dos componentes, contaminações, condições ambientais (umidade relativa do ar) e outros, e mostrou-se eficiente, conforme os resultados obtidos mostrados na Tabela 30.

Tabela 29 - Composição final após análise química

Corrida	Mg %	Al %	Zn %	Mn %	Si %	Ni %	Cu %	Fe %
1	Balanço	8,75	0,8	0,67	<0,01	0,003	0,008	0,02
2	Balanço	8,65	0,68	0,2	<0,01	0,002	0,002	0,01
3	Balanço	8,90	0,67	0,24	0,2	0,004	0,004	0,05
4	Balanço	8,75	0,67	0,25	<0,01	0,004	0,005	0,06
5	Balanço	8,90	0,73	0,2	0,023	0,002	0,003	0,02
6	Balanço	8,60	0,72	0,18	0,01	0,001	0,001	0,02
7	Balanço	8,80	0,73	0,17	0,02	0,003	0,006	0,01
8	Balanço	8,80	0,86	0,25	0,018	0,001	0,006	0,02
9	Balanço	8,70	0,71	0,17	0,04	0,002	0,006	0,02
10	Balanço	8,70	0,74	0,18	0,02	0,003	0,0019	0,02
11	Balanço	8,60	0,70	0,22	0,03	0,003	0,002	0,01
12	Balanço	8,60	0,80	0,21	0,014	0,003	0,002	0,02
13	Balanço	8,60	0,72	0,22	<0,01	0,002	<0,001	0,02
14	Balanço	8,61	0,74	0,22	<0,01	0,002	0,003	0,02
15	Balanço	8,70	0,75	0,21	0,07	0,002	0,001	0,02
16	Balanço	8,80	0,78	0,21	0,05	0,002	0,001	0,02
17	Balanço	8,70	0,71	0,21	<0,01	0,002	0,001	0,02
18	Balanço	8,80	0,77	0,21	<0,01	0,002	0,002	0,02
19	Balanço	8,70	0,80	0,2	0,028	0,003	0,002	0,02
20	Balanço	8,84	0,68	0,17	0,028	0,003	0,006	0,02
21	Balanço	8,60	0,83	0,2	0,019	0,003	0,002	0,02
22	Balanço	8,80	0,74	0,18	<0,01	0,003	0,008	0,02
23	Balanço	8,75	0,69	0,24	<0,01	0,003	0,004	0,02
24	Balanço	8,85	0,64	0,24	<0,01	0,003	0,006	0,05
25	Balanço	8,90	0,80	0,21	<0,01	0,003	0,003	0,02
26	Balanço	8,90	0,67	0,22	<0,01	0,003	0,004	0,04
27	Balanço	8,75	0,77	0,21	0,04	0,003	0,002	0,02
28	Balanço	8,70	0,80	0,22	<0,01	0,003	0,002	0,02

A avaliação das médias e dos respectivos desvios padrão da Tabela 30 mostra que as impurezas mais prejudiciais (Si, Ni, Cu e outros) encontradas nas análises foram menores que o limite máximo. Para os elementos de liga do Mg (Al, Zn e Mn), mesmo

considerando as variações de um desvio padrão, os valores estão dentro dos limites de composição da Tabela 8. Avaliando os resultados obtidos nas análises químicas decorrentes das corridas realizadas para a obtenção dos semicubos com a liga AZ91C, constata-se que os valores obtidos obedecem à especificação estabelecida, comparados com os valores da composição nominal da Tabela 6, bem como a tabela da composição limite (Tabela 8).

Tabela 30 – Valores médios de composição e desvio da composição nominal

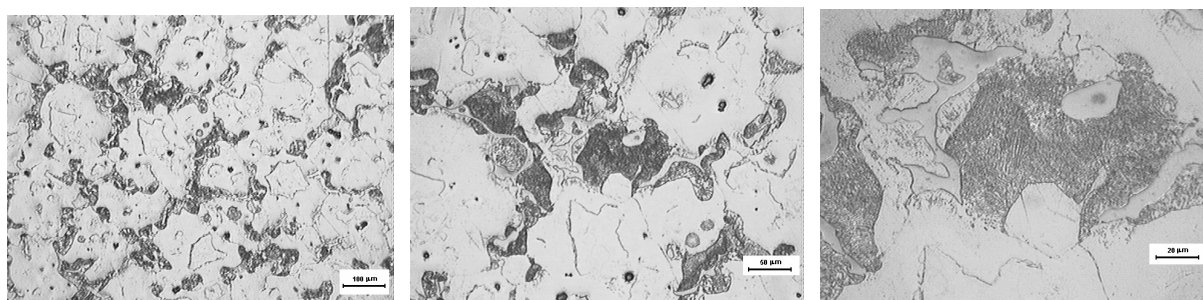
Elemento	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Ni	Cu	Outros
Composição	90,3±0,1	8,7±0,1	0,74±0,05	0,21±0,02	0,02±0,04	0,0026±0,0007	0,003±0,002	0,02±0,01
Erro médio Relativo à composição nominal	0,68%	0,44%	5,05%	-13,09%	-92,62%	-74,29%	-96,86%	-92,38%

4.3 AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA

As Figuras 85a, 85b e 85c mostram o aspecto da microestrutura da liga AZ91C com suas respectivas fases, constituintes e compostos intermetálicos na designação F-*como fundido*, ou seja, no “*estado bruto de solidificação*”, cuja estrutura é formada por uma solução sólida [$\alpha(M) + Al$] que constitui a matriz e uma fase $\beta(Mg + Al)$ que se apresentam com aspectos distintos: o primeiro na forma de um maciço branco, brilhante e irregular e o segundo com aspecto lamelar, semelhante ao da perlita nos aços, como se vê na Figura 85c.

O aparecimento deste maciço é atribuído a forma de resfriamento que é submetido a liga. O seu mecanismo de formação ocorre da seguinte forma: Devido a baixa difusibilidade do alumínio nos cristais primários de $\alpha(Mg)$ formados durante a solidificação, ele é segregado para a porção ainda líquida. Com o crescimento dos cristais de $\alpha(Mg)$ o líquido residual se enriquece de alumínio sofrendo um sub-resfriamento, solidificando-se a uma temperatura pouco acima da do eutético, formando desta maneira, nos espaços entre as dentritas os maciços de $\beta(Mg - Al)$.

A formação do eutético lamelar é devido ao mecanismo de resfriamento que proporciona o enriquecimento de alumínio na fase $\alpha(\text{Mg})$ nas regiões próximas a seu contorno. Com o prosseguimento do resfriamento, a supersaturação destas regiões ocasionam a precipitação da fase $\beta(\text{Mg} - \text{Al})$ em forma de lamelas, apresentando então a estrutura eutética lamelar .



(a) 100X

(b) 200X

(c) 500X

Figura 85 - Aspecto da microestrutura da liga AZ91C-F fundida em areia apresentando a fase massiva [$\alpha(\text{Mg}) + \beta(\text{Mg} - \text{Al})$] rodeada pelo precipitado lamelar $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$. Ataque: Acético-Glicol – 15s.

A análise da microestrutura é um procedimento importante na qualificação do fundido, servindo de interpretação das fases, constituintes, compostos intermetálicos, tamanho e forma de grão, inclusões, descontinuidades, etc, e oferecendo informações significativas na avaliação e análise dos resultados nos demais ensaios do material. Durante as atividades de fundição foram feitas análises micrográficas para o acompanhamento do processo e verificação da qualidade da microestrutura do material.

4.4 AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS

4.4.1 Levantamento das propriedades mecânicas dos corpos de prova fundidos separados, representativos de cada corrida.

Considerando os valores de referência das propriedades mecânicas da liga AZ91C especificados na norma padrão para ligas de magnésio fundidas em areia – ASTM B 80-90, Tabela 31 e os valores obtidos nos ensaios mecânicos dos corpos de prova fundidos separadamente, representativos das fusões dos semicubos, Tabela 32,

verifica-se que os limites de resistência, escoamento e o alongamento estão em conformidade com a norma e parâmetros estabelecidos para a liga.

Os corpos de prova ensaiados são representativos das fusões (duas por dia) processadas durante a jornada de trabalho, cujos resultados obtidos, mostrados na Tabela 32, são relativos à última corrida realizada no dia.

Ressalta-se que os valores alcançados nos ensaios com os corpos de prova para qualificação dos semicubos fundidos em liga de magnésio AZ91C em moldes de areia ao serem comparados com o padrão de referência das propriedades mecânicas da liga no estado “bruto de fusão” refletem o nível da qualidade técnica empregada no processo de fundição, a qualidade metalúrgica da matéria prima que apresenta baixos teores de impurezas na sua composição e a aplicação correta do procedimento recomendado pela Norma ASTM E 8M – 95a **Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Material** para ensaios de corpos de prova metálico.

Tabela 31 – Propriedades mecânicas da liga AZ91C – F, ASTM B 80-90.

Propriedades Mecânicas	σ_t	σ_e	ϵ %
	Resistência à tração	Limite de escoamento	alongamento (base 50,8 mm)
Liga AZ91C-F	165 MPa	97 MPa	2,5 %

Tabela 32 - Propriedades Mecânicas dos corpos de prova fundidos

Corrida	ϕ (x10 ⁻³ m)	S m ² (x10 ⁻⁶ m)	Fr (N)	σ_t (MPa)	σ_e (N)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	Lo (x10 ⁻³ m)	L (x10 ⁻³ m)	ϵ %
2	12,5	122,65	23830,15	194,29	13425,26	109,46	50,0	52,5	5,0
4	12,5	122,65	20594,00	167,90	12199,99	99,47	50,0	51,6	3,2
6	12,6	124,62	22555,30	180,99	13307,43	106,78	50,0	52,0	4,0
8	12,5	122,65	24026,30	195,90	13692,64	111,64	50,0	53,0	6,0
10	12,5	122,65	22555,30	183,82	13177,51	107,44	50,0	52,5	5,0
12	12,6	124,62	24101,50	193,40	13720,66	110,40	50,0	53,0	6,0
14	12,6	124,62	23946,97	192,16	13679,53	109,77	50,0	52,8	5,6
16	12,5	122,65	23990,34	195,60	13744,15	112,06	50,0	52,9	5,8
18	12,6	124,62	21530,64	172,77	12544,24	100,66	50,0	51,7	3,6
20	12,5	122,65	21696,78	176,90	12772,77	104,14	50,0	52,0	4,0
22	12,5	122,65	23781,12	193,89	13539,33	110,39	50,0	52,5	5,0
24	12,5	122,65	22408,19	182,70	13129,68	107,05	50,0	52,7	5,4
26	12,5	122,65	22947,56	187,09	13284,22	108,31	50,0	52,5	5,2
28	12,6	124,62	23661,52	189,86	13574,85	108,93	50,0	52,4	4,8
30	12,5	122,65	23388,86	190,69	13371,30	109,02	50,0	52,7	5,4
32	12,5	122,65	23990,67	195,60	13571,22	110,65	50,0	52,5	5,0
34	12,5	122,65	22343,96	182,17	13138,26	107,12	50,0	52,8	5,6

Obs:

ϕ = Diâmetro da Seção Crítica;

S = Área da Seção Crítica;

Fr = Carga de Ruptura;

σ_t = Limite de Ruptura (Limite de Resistência);

σ_e = Carga de Escoamento;

$\sigma_{0.2}$ = Limite de Escoamento ;

Lo = Comprimento Inicial da Seção Reduzida;

L = Comprimento Final da Seção Reduzida;

ϵ % = Alongamento Percentual Base: 50 mm.

4.5 AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS RADIOGRÁFICOS

O controle de qualidade dos semicubos aeronáuticos fundidos em liga de magnésio AZ91C pelo processo de moldagem em areia a verde foi feito dentro dos requisitos mínimos estabelecidos para aplicações aeronáuticas em conformidade com o padrão aeroespacial estabelecido na norma Aerospace Standard AS 586 da Society of Automotive Engineers - SAE.

Submetidos a ensaios destrutivos e não destrutivos para avaliar a qualidade metalúrgica e condições de aplicabilidade aeronáutica, os semicubos foram objetos dos ensaios de análise química, ensaio metalográfico para análise da microestrutura, ensaio mecânico para avaliar as propriedades mecânicas e ensaios radiográficos para verificar a presença de descontinuidades na estrutura interna do fundido.

O ensaio radiográfico de componentes aeronáuticos estruturais é feito sob um rígido controle aprovação com exigências e requisitos mínimos aceitáveis para avaliar a estrutura interna com base em padrões aeronáuticos das normas MIL E ASTM, conforme descrito no Apêndice B.

Tais exigências têm como referência as normas internacionais, cujos critérios serviram para aceitar e/ou rejeitar o fundido que sofreu modificações para corrigir os defeitos de fundição e otimizar o processo de fundição em curso.

No desenvolvimento dos semicubos foi estabelecido que a cada dez semicubos fundidos, após o completo controle de qualidade, modificações seriam implementadas no processo.

Considerando dez unidades fundidas uma quantidade ótima para se ter um diagnóstico mais consistente do lote de peças fundidas e processar as correções e/ou medidas técnicas necessárias para melhoria contínua do processo foi iniciado as dez primeiras fusões usando o modelo do semicubo com chaveta conforme procedimento técnico a seguir:

Procedimento Técnico #1A - SEMICUBOS COM CHAVETAS:

Para moldagem dos semicubos com chavetas, identificados na Tabela 33 pelos números de corrida 1A a 5B foi feito previamente um estudo do modelo seguido da elaboração do projeto de dimensionamento do sistema de alimentação da peça conforme mostra em detalhes as Figuras 50 e 71, com a descrição dos elementos de composição do sistema de alimentação.

A configuração inicial do sistema se apresenta de acordo com a descrição abaixo:

- Duas bacias de vazamento para obter maior velocidade no vazamento;
- Dois canais de descida em lápis para evitar perdas por oxidação;
- Quatro canais de distribuição e quatro de ataque dispostos na região do flange para distribuir e conduzir o fluxo metálico até a cavidade do molde;
- Quatro reguladores de pressão para o controlar a velocidade do jato metálico e regular a entrada do metal na cavidade do molde evitando o arraste de impurezas, partículas de areia, etc;

- Um resfriador metálico, circular, em contato com a superfície do flange para direcionar a solidificação;
- Sete resfriadores metálicos em aço 1020 posicionados na região dos ressaltos das chavetas para uniformizar a temperatura de solidificação da região da banda do semicubo;
- Um resfriador cilíndrico, bipartido, situado na superfície interna do furo de fixação para direcionar a solidificação no sentido peça-alimentador;
- Quatro alimentadores trapezoidais, em madeira, distribuídos simetricamente na superfície externa dos furos de fixação para suprir e alimentar as regiões de maior massa;
- Um alimentador cilíndrico localizado na superfície do furo do eixo do semicubo para alimentar a diferença de seção entre os furos de alívio e a base do eixo.

Com essa configuração foi dado início a fundição do semicubo-**1A**, a temperatura 730 °C, e aos demais no intervalo de 5°C, sendo o último, semicubo – **5B**, a 775°C, formando assim um lote de 10 semicubos para controle da qualidade.

A Figura 86 mostra os resultados do controle de qualidade - *ensaios radiográficos*, realizado nos semicubos fundidos com temperatura de vazamento iniciada em 730 °C e finalizada em 775 °C, nos intervalos de 5 °C em 5 °C, cada.

Tabela 33 - Resultados dos ensaios radiográficos de rodas com chaveta – Corridas 1A a 5B.

Corrida	Banda		Flange		Furos de Fixação		Furos de Alívio		Chaveta	Banda	Flange	Fixação	Alívio	Peça
	Tipo	Nível	Tipo	Nível	Tipo	Nível	Tipo	Nível						
1A	feathery	3	menos	2	sponge	2	feathery	1	reprov**	aprov	aprov	aprov	aprov	reprov
1B	menos	6	bolha	3	0	0	0	0	aprov*	reprov	reprov	aprov	aprov	reprov
2A	menos	6	menos	4	0	0	0	0	aprov	reprov	reprov	aprov	aprov	reprov
2B	sponge	3	menos	4	sponge	2	mais	2	aprov	reprov	reprov	aprov	aprov	reprov
3A	menos	2	0	0	sponge	1	feathery	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
3B	bolha	1	sponge	1	sponge	2	sponge	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
4A	menos	6	0	0	0	0	0	0	aprov	reprov	aprov	aprov	aprov	reprov
4B	feathery	2	sponge	1	feathery	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
5A	feathery	4	sponge	2	sponge	2	sponge	2	aprov	reprov	aprov	aprov	aprov	reprov
5B	feathery	4	menos	3	sponge	2	sponge	2	aprov	reprov	reprov	aprov	aprov	reprov

* aprov = Aprovado ** reprov =Reprovado

- Feathery =microcontração; Sponge=microcontração; menos= material menos denso; mais= material mais denso.

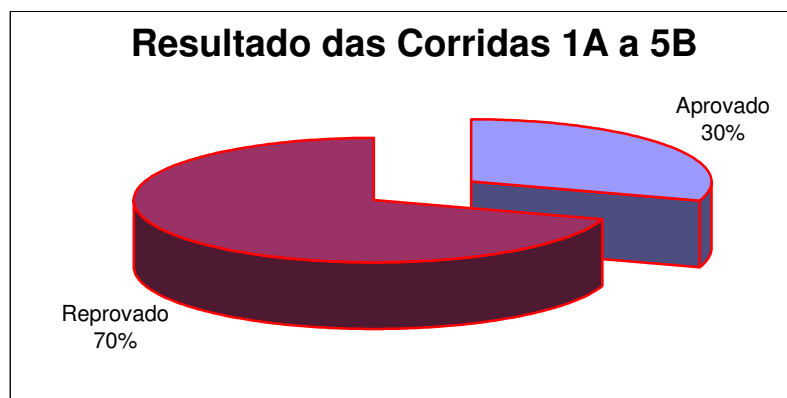


Figura 86 - Gráfico de Resultado das Corridas Número 1A a 5B – Semicubos com Chavetas

Analisando o gráfico da Figura 86, com 70% de refugo, e considerando a evolução do processo de fundição dos semicubos em relação às temperaturas de vazamento experimentadas e as demais características de fundição como: fluidez, velocidade de escoamento e taxa de vazão constatou-se que a faixa de temperatura de 760 °C a 762 °C foi considerada a faixa ideal de vazamento para os semicubos com chavetas. Após a solidificação das peças, foram observados, pelo exame visual, defeitos superficiais externos como: irregularidades de superfície, bolhas; e defeitos internos através dos ensaios radiográficos como: micro-contrações do tipo feathery, bolhas e material menos denso, concluindo-se que o sistema de alimentadores deveria ser redimensionado de quatro unidades para seis, nas mesmas dimensões.

Procedimento Técnico #2A - SEMICUBOS COM CHAVETAS:

Considerando a análise dos resultados obtidos com os dez primeiros semicubos, identificados nas corridas 1A a 5B foi elaborada a revisão dos parâmetros de vazamento e re-estudado o sistema de alimentação resultando no redimensionamento dos alimentadores trapezoidais posicionados no furo de fixação, que passaram de quatro para seis com o objetivo reduzir o nível de defeitos na região, eliminar perdas e otimizar o processo. Os demais parâmetros como temperatura de vazamento entre 760 °C e 762 °C e temperatura de aquecimento dos resfriadores do flange, banda e chavetas foram mantidos constantes, assim como as demais características do processo de moldagem, mostrado em detalhes a Figura 50, como: bacia de vazamento, canais de descida, canais de distribuição e ataque, reguladores de pressão, resfriadores do

flange, chaveta e da base dos furos de fixação e alimentador cilíndrico do furo do eixo foram aplicados para a obtenção dos semicubos das corridas 6A até 10B. Após as modificações os resultados obtidos nos ensaios radiográficos são mostrados na Tabela 34 e Figura 87, que apresentam um índice de rejeição - 50%, considerado alto, porém significativo para as modificações propostas.

Tabela 34 - Resultados dos ensaios radiográficos de rodas com chavetas – Corridas 6A a 10B

Corrida	Banda		Flange		Furos de Fixação		Furos de Alívio		Chaveta	Banda	Flange	Fixação	Alívio	Peça
	Tipo	Nível	Tipo	Nível	Tipo	Nível	Tipo	Nível						
6A	feathery	2	sponge	1	sponge	2	sponge	2	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
6B	mais	2	sponge	1	sponge	2	sponge	2	aprov	reprov	aprov	aprov	aprov	reprov
7A	feathery	2	sponge	1	sponge	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
7B	feathery	2	sponge	2	sponge	2	bolha	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
8A	feathery	2	sponge	4	sponge	2	0	0	aprov	aprov	reprov	aprov	aprov	reprov
8B	feathery	2	0	0	sponge	2	feathery	2	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
9A	menos	2	0	0	sponge	1	sponge	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
9B	feathery	7	sponge	1	sponge	2	bolha	1	aprov	reprov	aprov	aprov	aprov	reprov
10A	feathery	2	menos	3	sponge	2	mais	2	aprov	aprov	reprov	aprov	aprov	reprov
10B	menos	6	sponge	1	bolha	3	sponge	3	aprov	reprov	aprov	aprov	reprov	reprov

* aprov = Aprovado ** reprov =Reprovado

• Feathery =microcontração; Sponge=microcontração; menos= material menos denso; mais= material mais denso.

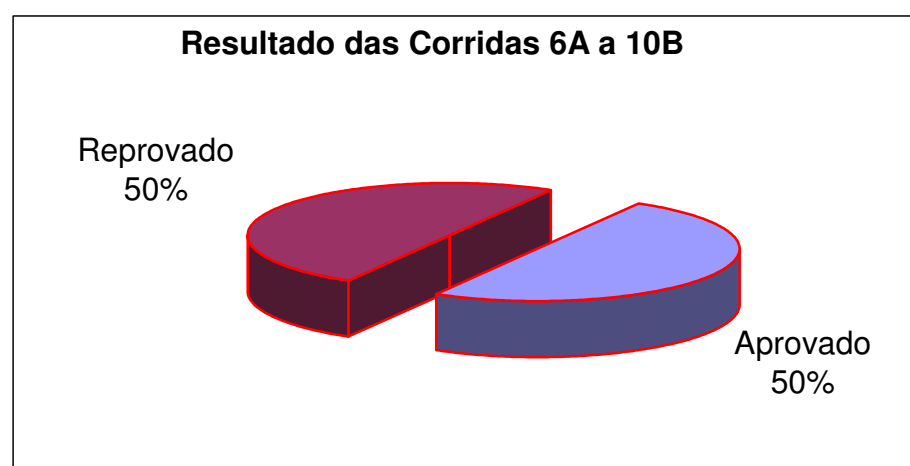


Figura 87 - Gráfico de Resultado das Corridas 6A a 10B - Semicubos com Chavetas

O resultado dos ensaios radiográficos dos semicubos com chavetas identificados pelos números de corrida 6A até 10B apresentaram variações de defeitos

superficiais externos e internos tais como: irregularidades superficiais, bolhas, material mais denso, material menos denso, micro-contração do tipo sponge, concluindo que o procedimento adotado requer medidas técnicas corretivas para eliminar os defeitos de fundição e otimizar a qualidade metalúrgica do fundido.

Procedimento Técnico #3A - SEMICUBOS COM CHAVETAS:

Tomando como referência os resultados dos semicubos com chavetas identificados nas corridas 6A a 10B, constatou-se que o procedimento técnico adotado apresentava resultado pouco satisfatório, como mostra a Tabela 34. Para tanto, foi necessário proceder novo levantamento dos parâmetros de fundição e analisar o redimensionamento do sistema de alimentação nas regiões da banda e dos furos de fixação, onde a concentração dos defeitos de contração eram mais acentuados. Assim, foi configurado um novo sistema de alimentador, mostrado na Figura 88, cobrindo toda a região dos furos de fixação para aumentar a massa líquida nas zonas deficientes, e removido, após verificação do tempo e velocidade de solidificação nessas regiões, o resfriador situado na região inferior dos furos de fixação do semicubo de modo a proporcionar condições favoráveis de resfriamento direcional no sentido peça alimentador. Os demais parâmetros como temperatura de vazamento, bacia de vazamento, canais de descida, canais de distribuição e ataque, reguladores de pressão, resfriador do flange e das chavetas foram mantidos nas mesmas condições anteriores de fundição dos semicubos identificados nas corridas 6A até 10B.

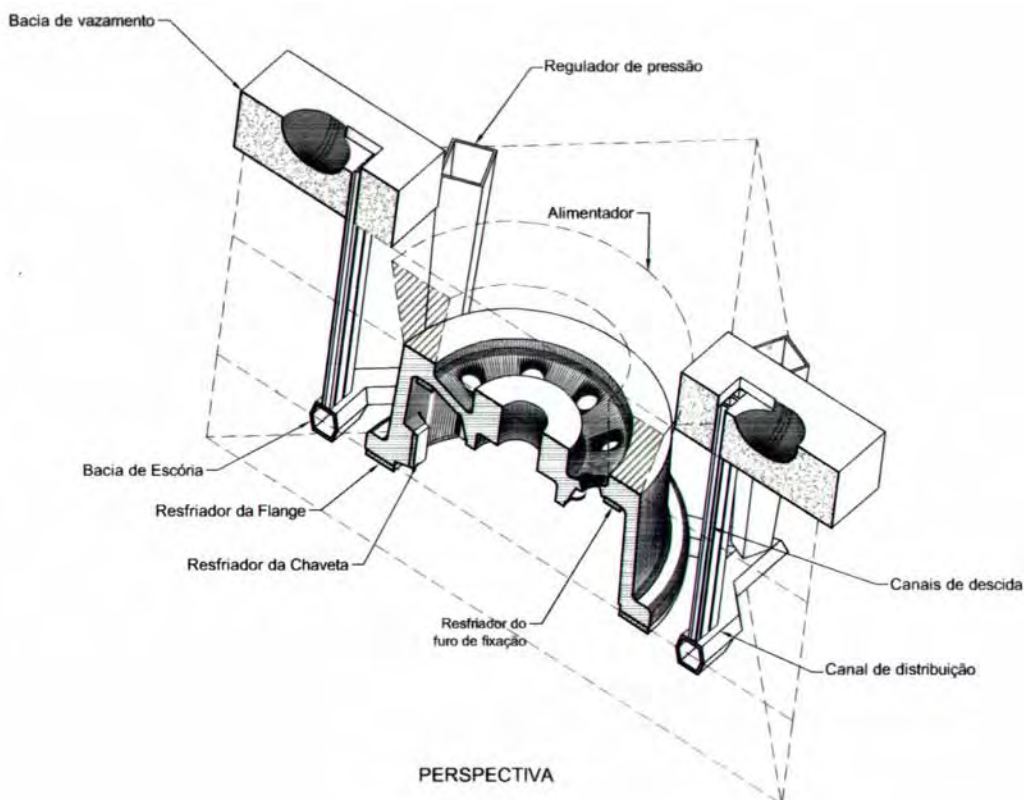


Figura 88 – Perspectiva do sistema de alimentação do semicubo com alimentador inteiro, circular, posicionado na região dos furos de fixação e resfriador sob a região do flange.

Tabela 35 - Resultados dos ensaios radiográficos de rodas com chavetas - Corridas 11A a 15B.

Corrida	Banda		Flange		Furos de Fixação		Furos de Alívio		Chaveta	Banda	Flange	Fixação	Alívio	Peça
	Tipo	Nível	Tipo	Nível	Tipo	Nível	Tipo	Nível						
11A	feathery	2	0	0	sponge	3	sponge	2	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
11B	feathery	2	sponge	1	sponge	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
12A	feathery	2	0	0	sponge	1	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
12B	feathery	2	feathery	1	sponge	1	mais	2	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
13A	feathery	2	0	0	sponge	2	sponge	2	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
13B	feathery	1	0	0	sponge	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
14A	feathery	2	bolha	1	sponge	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
14B	feathery	2	sponge	1	sponge	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
15A	feathery	7	sponge	1	sponge	2	bolha	1	aprov	reprov	aprov	aprov	aprov	reprov
15B	feathery	2	0	0	sponge	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov

* aprov = Aprovado ** reprov =Reprovado

• Feathery =microcontração; Sponge=microcontração; menos= material menos denso; mais= material mais denso.

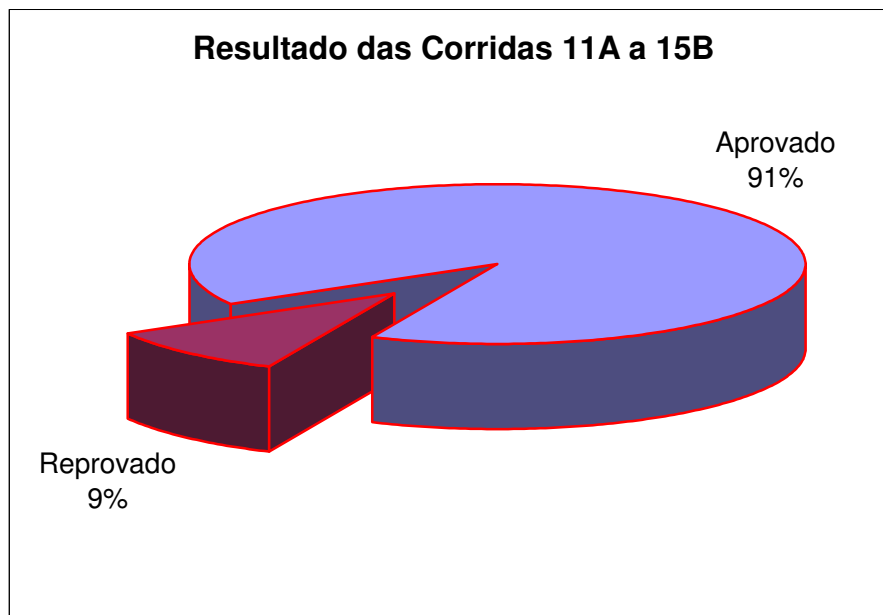


Figura 89 - Gráfico de Resultado das Corridas 11A a 15B – Semicubos com Chavetas

Os resultados obtidos através dos ensaios radiográficos dos semicubos com chavetas indicados pelos números de corrida 11A até 15B mostraram que o índice de rejeição dos fundidos diminuiu consideravelmente, para 9%, indicando que o procedimento técnico adotado apresentava um nível de confiabilidade aceitável para os padrões aeronáuticos.

Procedimento Técnico #4A - SEMICUBOS COM CHAVETAS:

Considerando os índices de aceitabilidade e acertos obtidos com o Procedimento Técnico #3A para os semicubos com chavetas, procurou-se reproduzir o procedimento anterior para os semicubos das corridas 16A a 23B, nas mesmas condições aplicadas na obtenção dos semicubos das corridas 11A a 15B.

Tabela 36 - Resultados dos ensaios radiográficos de rodas com chavetas - Corridas 16A a 23B

Corrida	Banda		Flange		Furos de Fixação		Furos de Alívio		Chaveta	Banda	Flange	Fixação	Alívio	Peça
	Tipo	Nível	Tipo	Nível	Tipo	Nível	Tipo	Nível						
16A	feathery	3	0	0	sponge	2	0	0	aprov	reprov	aprov	aprov	aprov	reprov
16B	feathery	2	0	0	sponge	2	mais	2	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
17A	feathery	2	0	0	sponge	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
17B	menos	2	0	0	sponge	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
18A	feathery	2	0	0	sponge	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
18B	feathery	1	menos	2	sponge	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
19A	feathery	2	0	0	sponge	1	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
19B	feathery	2	sponge	1	sponge	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
20A	feathery	2	0	0	sponge	1	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
20B	feathery	1	sponge	1	sponge	2	sponge	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
21A	feathery	2	sponge	1	sponge	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
21B	feathery	2	0	0	feathery	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
22A	feathery	2	0	0	sponge	2	bolha	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
22B	feathery	2	0	0	feathery	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
23A	feathery	2	sponge	1	sponge	2	0	0	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
23B	feathery	2	sponge	1	sponge	3	feathery	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov

* aprov = Aprovado ** reprov =Reprovado

• Feathery =microcontração; Sponge=microcontração; menos= material menos denso; mais= material mais denso.

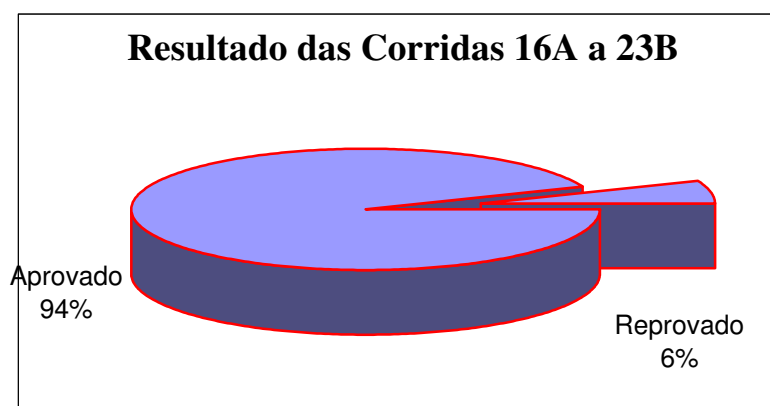


Figura 90 - Gráfico de resultado das Corridas 16A a 23B – Semicubos com Chavetas

Verificou-se que os semicubos com chavetas obtidos nas corridas 16A a 23B mostraram um elevado índice de aprovação e confiabilidade (94,0%), conforme mostrado na Figura 90, satisfazendo os limites fixados na Tabela II do Apêndice B – Níveis de severidade máximo de discontinuidades permissíveis em cada região de um semicubo, do método de ensaio número N^o ME-AMR-L-001, Mar./94. do Min. Aer, e os requisitos de aceitação e qualidade para aplicações aeronáuticas.

Levando em consideração o desenvolvimento processado na fundição dos semicubos com chavetas, a Figura 91 apresenta um quadro demonstrativo retratando o grau evolutivo das fusões referentes às corridas de número 1A a 23B, mostrando o desenvolvimento do processo de fundição ao longo de todas as etapas, culminando com a aprovação final dos fundidos para uso e aplicação aeronáutica.

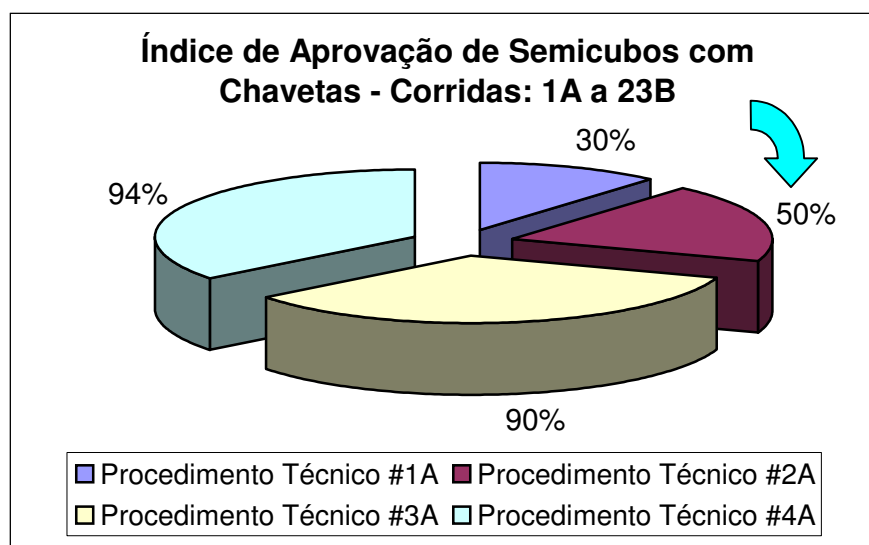


Figura 91 - Gráfico do Índice de Aprovação de Semicubos com Chavetas - Corridas 1A a 23B

Conforme as tabelas 33 a 36 das corridas processadas de número 1A a 23B, foi feito um quadro demonstrativo, contido na Tabela 37, que mostra os índices gerais de reprovação por região do semicubo com chaveta para que se tenha um diagnóstico do índice de rejeição das regiões inspecionadas e do grau de dificuldade apresentado no controle do processo metalúrgico na operação de fundição.

Tabela 37 – Índices de reprovação por região de inspeção radiográfica dos semicubos com chavetas.

Índice de Reprovação da Chaveta	Índice de Reprovação da Banda	Índice de Reprovação do Flange	Índice de Reprovação do Furo de Fixação	Índice de Reprovação do Furo de Alívio	Reprovação Total
4,35%	17,57%	13,04%	0,00%	2,17%	36,96%

A Tabela 38 mostra um quadro geral da distribuição por lotes de corrida dos percentuais de rejeição dos semicubos com chavetas durante o processo de desenvolvimento.

Tabela 38 – Índices de reprovação dos semicubos com chavetas identificados pelos lotes - 1A a 5B, 6A a 10B, 11A a 15B, 16A a 20B, 21A a 23B e pelos lotes de 1A a 10B e 11A a 23B.

Reprovação por lote de 10 Corridas		
Procedimento Técnico	Corrida	Índice de Reprovação
#1	1A a 5B	70,00%
#2	6A a 10B	50,00%
#3	11A a 15B	9,00%
#4	16A a 20B	9,00%
#4	21A a 23B	0,0%
Reprovações por lote de 20 corridas		
Procedimento Técnico	Corrida	Índice de Reprovação
#1 e #2	1A a 10B	60 %
#3 e #4	11A a 23B	7,69%

Para o desenvolvimento dos semicubos sem chaveta adotou-se, por consenso técnico, iniciar um desenvolvimento paralelo ao dos semicubos com chaveta para possibilitar e acompanhar de forma efetiva o desempenho e a evolução de cada componente. Para isso, foram adotados alguns critérios diferenciados no procedimento técnico tendo em vista que cada semicubo, por apresentar uma configuração diferente, necessitava de estudo particularizado para o seu desenvolvimento. Assim foram iniciadas as onze primeiras fusões usando o modelo do semicubo sem chavetas conforme procedimento técnico a seguir:

Procedimento Técnico #1B - SEMICUBOS SEM CHAVETAS:

Para moldagem dos semicubos sem chavetas, identificados na Tabela 39 pelos números de corrida 24A a 29A foi feito previamente um estudo do modelo seguido da elaboração do projeto de dimensionamento do sistema de alimentação da peça

conforme mostra em detalhes a Figura 50 com a descrição dos elementos de composição do sistema de alimentação.

A configuração inicial do sistema a mesma descrita para o semicubo com chaveta no procedimento técnico #1A, com exceção dos resfriadores aplicados na região das chavetas.

Nessas características, cada semicubo foi fundido a temperatura que variou de 720 °C a 770 °C, sendo o primeiro Semicubo - 24A, fundido a temperatura de 720 °C, e os demais no intervalo de 5 °C, sendo o último Semicubo – 29A, fundido a temperatura de 770 °C.

Tabela 39 - Resultados dos ensaios radiográficos dos semicubos sem chavetas-
Corridas 24A a 29A.

Corrida	Banda		Flange		Furos de Fixação		Furos de Alívio		Banda	Flange	Fixação	Alívio	Peça
	Tipo	Nível	Tipo	Nível	Tipo	Nível	Tipo	Nível					
24A	feathery	8	-	-	-	-	-	-	reprov	-	-	-	reprov
24B	feathery	6	-	-	-	-	-	-	reprov	-	-	-	reprov
25A	feathery	7	-	-	-	-	-	-	reprov	-	-	-	reprov
25B	feathery	6	-	-	-	-	-	-	reprov	-	-	-	reprov
26A	feathery	2	sponge	1	sponge	2	feathery	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
26B	feathery	2	sponge	1	sponge	2	feathery	2	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
27A	feathery	2	sponge	1	sponge	2	gas	4	aprov	aprov	aprov	reprov	reprov
27B	feathery	1	sponge	1	sponge	1	feathery	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
28A	feathery	1	sponge	1	sponge	1	feathery	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
28B	feathery	2	sponge	1	sponge	2	feathery	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
29A	feathery	1	sponge	1	sponge	1	feathery	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov

* aprov = Aprovado ** reprov =Reprovado

• Feathery =microcontração; Sponge=microcontração; menos= material menos denso; mais= material mais denso.

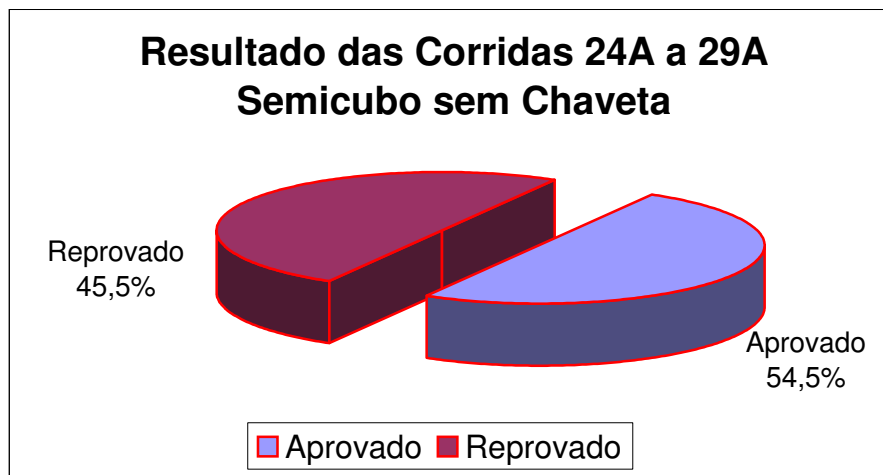


Figura 92 - Gráfico de Resultado das Corridas 24A a 29A – Semicubos sem chavetas

Analisando o gráfico da Figura 92, verifica-se que o procedimento adotado para a fundição dos semicubos apresentou um índice de refugo 45,5%, diante dos experimentos realizados com temperaturas de vazamento variadas tendo sido analisadas outras características de fundição como: fluidez, velocidade de escoamento e taxa de vazão constatando-se que a faixa de 755°C a 760°C foi a que ofereceu melhor resposta de vazamento, sendo tomada como a temperatura ideal de vazamento para os semicubos sem chavetas. Após a solidificação das peças, foram observados, pelo exame visual, defeitos superficiais externos como bolhas de gás; e defeitos internos através dos ensaios radiográficos como micro-contrações do tipo feathery e sponge, concluindo-se que o sistema de alimentadores deveria ser redimensionado através de novo estudo.

Procedimento Técnico #2B - SEMICUBOS SEM CHAVETAS:

Tomando como referência os resultados dos semicubos com chavetas no Procedimento Técnico # 3A e # 4A, foi configurado um novo sistema de alimentador, mostrado na Figura 88, cobrindo toda a região dos furos de fixação. Os demais parâmetros como temperatura de vazamento, bacia de vazamento, canais de descida, canais de distribuição e ataque, reguladores de pressão, resfriador do flange foram mantidos nas mesmas condições anteriores de fundição dos semicubos identificados nas corridas de número 24A até 29A.

Tabela 40 - Resultados dos ensaios radiográficos de semicubos sem chavetas

Corrida	Banda		Flange		Furos de Fixação		Furos de Alívio		Banda	Flange	Fixação	Alívio	Peça
	Tipo	Nível	Tipo	Nível	Tipo	Nível	Tipo	Nível					
29B	feathery	1	sponge	1	sponge	1	feathery	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
30A	feathery	1	sponge	1	sponge	2	feathery	2	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
30B	feathery	5	-	-	-	-	-	-	reprov	-	-	-	reprov
31A	feathery	2	menos	2	sponge	1	feathery	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
31B	feathery	2	sponge	1	sponge	1	feathery	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
32A	feathery	2	sponge	2	sponge	1	sponge	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
32B	feathery	1	sponge	1	sponge	1	feathery	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
33A	sponge	2	menos	1	menos	2	sponge	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
33B	feathery	1	sponge	2	sponge	2	feathery	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
34A	sponge	2	menos	1	menos	2	sponge	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov
34B	feathery	2	sponge	1	sponge	2	sponge	1	aprov	aprov	aprov	aprov	aprov

♦ aprov – Aprovado

reprov - Reprovado

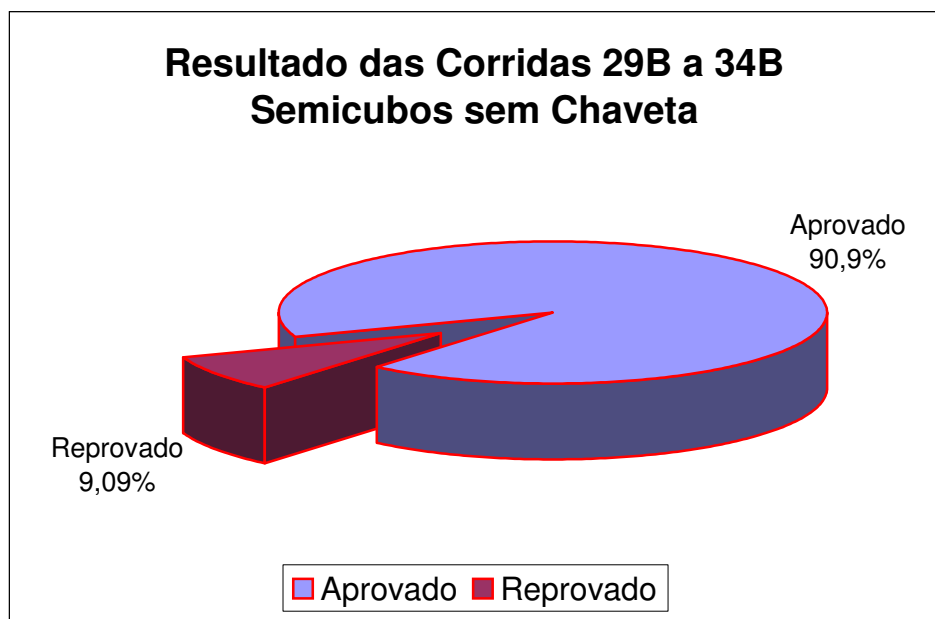


Figura 93 - Gráfico de Resultado das Corridas 29A a 34B – Semicubos sem chavetas

Os resultados dos ensaios radiográficos dos semicubos sem chavetas indicados pelos números de corrida 29B até 34B com o emprego do procedimento anteriormente descrito mostraram que o índice de rejeição dos fundidos diminuiu para 9,09%, indicando que o procedimento técnico adotado apresentava um nível de confiabilidade aceitável para os padrões aeronáuticos

Considerando os resultados obtidos na fundição dos semicubos sem chavetas, como mostra a Figura 94, cujo quadro demonstrativo retrata o grau de evolução da

técnica de fundição na obtenção dos fundidos às corridas de número 24A a 34B, constatou-se que a referida técnica serviu para consolidar a aprovação final dos fundidos e proporcionar confiabilidade destes para uso e aplicação aeronáutica.

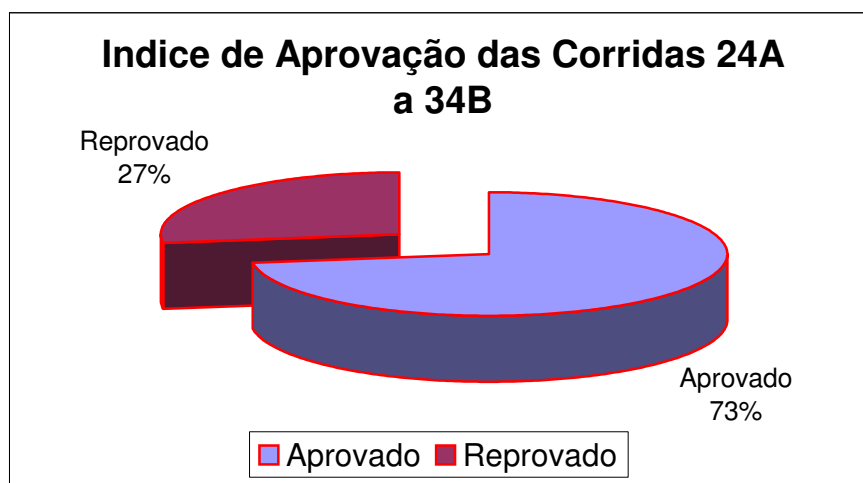


Figura 94 - Gráfico do Índice de Aprovação das Corridas 24A a 34B – Semicubos sem chavetas

De acordo com as tabelas 39 e 40 referente às corridas de número 24A a 34B, verificou-se através do quadro demonstrativo da Tabela 41, que os índices gerais de reprovação por região do semicubo sem chaveta se concentravam na região da Banda do Semicubo em decorrência das temperaturas de vazamento inadequadas e do sistema de alimentação insuficiente para prover com metal líquido a região de alto resfriamento.

Tabela 41 – Índices gerais de reprovação do semicubo sem chavetas

Índice de Reprovação da Banda	Índice de Reprovação do Flange	Índice de Reprovação do Furo de Fixação	Índice de Reprovação do Furo de Alívio	Reprovação Total
22,73%	0,00%	0,00%	4,55%	27,27%

Analisando o cômputo geral do desenvolvimento processado nos semicubos sem chavetas, observa-se através da Tabela 42 que os índices de aprovação por lote de semicubos fundidos nas corridas 24A a 29A apresentam um baixo índice de aprovação enquanto que os semicubos das corridas 29B a 34B mostraram uma evolução confiável e aceitável para a aplicação aeronáutica. Entretanto, verifica-se que ao analisar o

desempenho de todas as corridas de semicubos sem chavetas (24A a 34B) constata-se que o índice de aprovação obtido está compatível à condição de desenvolvimento de processo, contudo não atende economicamente o processo produtivo. Este atendimento é verificado nas corridas 28A a 34B, excedendo às expectativa, uma vez que um processo de fundição em areia verde, para componentes aeronáuticos, é considerado economicamente viável quando o aproveitamento for superior a 88% de aprovação.

Tabela 42 – Índices de aprovação dos semicubos sem chavetas por lote de 11 Corridas

Aprovação		
Procedimento Técnico	Corrida	Índice de Aprovação
#1B	24A a 29A	54,55%
#2B	29B a 34B	90,91%
#1B e #2B	24A a 34B	72,73%
#2B	28A a 34B	92,85%

5 CONCLUSÕES

Dentro de uma análise objetiva sobre o desenvolvimento de semicubos de rodas do cargueiro militar C-115 “Buffalo”, verifica-se que os resultados obtidos foram altamente satisfatórios e úteis à Força Aérea Brasileira.

O processo e a técnica de fundição aplicada permitiram que o desenvolvimento desses itens atendessem as necessidades emergenciais tornando a frota operativa.

Os estudos realizados com base na literatura técnica para o desenvolvimento dos modelos e dos sistemas de alimentação dos semicubos permitiram concluir que:

- ▶ A *relação de fundição 1:2:2*, adotada no projeto de dimensionamento dos canais proporcionou um perfeito equilíbrio das áreas de vazamento favorecendo o enchimento do molde, evitando turbulência, formação de óxidos e arraste de escória. O escoamento uniforme obtido durante o vazamento contribuiu para a formação do fluxo laminar evitando uma alimentação inadequada do molde e a obtenção de semicubos com defeitos.

- ▶ A areia de moldagem empregada na confecção dos moldes usados na obtenção dos semicubos apresentou excelentes características de *moldabilidade e trabalhabilidade* produzindo moldes com qualidade, excelente acabamento e isentos de defeitos superficiais.

- ▶ O calculo estequiométrico para obtenção da carga metálica da liga AZ91C atendeu conforme a *composição de referência elaborada* as exigências das normas internacionais tendo sido controlado os valores quantitativos do elemento de liga, as perdas por oxidação e o teor de impurezas no balanço da carga, e os resultados das análises químicas após as fusões estavam em consonância com a composição nominal da liga .

- ▶ A *técnica de fundição aplicada no processo de fusão da carga metálica*, a adição dos elementos de liga e o controle das temperaturas durante as operações de adição de elementos de carga, proteção do banho, limpeza, desgaseificação, refino e vazamento proporcionaram a obtenção da liga AZ91C com qualidade metalúrgica e nível de aceitação dentro dos padrões aeronáuticos.

▶ O *controle de qualidade* dos semicubos foi realizado em corpos de prova representativos de cada ensaio de acordo com os padrões internacionais, através das análises químicas, metalográficas, propriedades da areia de moldagem, ensaios mecânicos e radiográficos, demonstrando que:

- ◆ Os resultados das análises químicas realizadas para caracterização da liga AZ-91C usada na obtenção dos semicubos estavam em conformidade com as normas e padrões internacionais.

- ◆ A análise da microestrutura da liga AZ91C, no estado bruto de solidificação, revelou um aspecto micrográfico de fases e constituintes compatíveis com os padrões e referências encontradas na literatura específica.

- ◆ A areia de moldagem desenvolvida e aplicada na elaboração dos moldes dos semicubos apresentou uma resistência a compressão de 69,5Kg/cm², permeabilidade de 85AFS, sob um teor de umidade de 1,44%, em um tempo de mistura de 9 minutos, tendo sido considerada uma mistura de alta qualidade ao produzir semicubos isentos de defeitos superficiais decorrentes do processo de moldagem.

- ◆ Os ensaios mecânicos realizados em corpos de provas fundidos separadamente, no estado bruto de solidificação, apresentaram valores médios de resistência a tração na ordem de 186,8 MPa, limite de escoamento na ordem de 107,84 MPa e alongamento de 4,9%, valores acima do mínimo estabelecido pelos padrões internacionais, evidenciando que o controle dos parâmetros de fundição foram executados em conformidade com o processo metalúrgico.

- ◆ Os ensaios radiográficos aplicados em todas as seções de cada semicubos conforme padrões aeroespaciais específicos para itens aeronáuticos, mostraram que o índice de aprovação alcançados ao final do desenvolvimento foi de 92,85%, para os semicubos com chaveta, e 94,0%, para os semicubos sem chaveta. De acordo com os padrões internacionais é admissível para o padrão aeroespacial perdas na fabricação de componentes aeronáuticos na ordem de 12%, face o grau de exigência da qualidade metalúrgica e a complexidade de fabricação desses itens.

Pelos resultados demonstrados nesse desenvolvimento constatou-se que o objetivo principal foi plenamente alcançado, permitindo a obtenção de semicubos aeronáuticos

com excelentes características metalúrgicas, oferecendo condições necessárias para desenvolvimento e aplicação em escala industrial de novos itens aeronáuticos.

Como o propósito deste trabalho foi obter semicubos no estado bruto de solidificação avaliando as suas propriedades metalúrgicas, outros processos para a melhoria destas propriedades mecânicas e de proteção superficial deixaram de ser estudadas para não torná-lo por demais extenso. Entretanto, cabe ressaltar que o tratamento térmico de solubilização, aplicável à liga AZ91C, melhora consideravelmente suas propriedades mecânicas, principalmente a resistência ao impacto e aos esforços estáticos e dinâmicos, tornando este componente em perfeitas condições de aplicação e uso aeronáutico.

Finalmente, no universo dos processos metalúrgicos, principalmente de fundição, verifica-se que o tema da pesquisa e do desenvolvimento de componentes aeronáuticos – semicubos de roda é amplo e complexo, merecendo uma discussão extensa, uma vez que este trabalho não esgota o tema proposto.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros que os recentes desenvolvimentos de ligas de magnésio fundidas, que apresentem características compatíveis com aplicações aeronáuticas, em especial para componentes estruturais, como os semicubos, sejam pesquisadas, bem como novos tratamentos térmicos e processos de fundição com o objetivo de dar continuidade ao desenvolvimento de tecnologias específicas de fundição para a obtenção de itens aeronáuticos de alta eficiência.

BIBLIOGRAFIA:

- ABIFA – **Núcleo de Estudos de Mercado** – Associação Brasileira de Fundição, 1º Semestre/2005.
- ABIFA – **Boletim do Desempenho do Setor de Fundição** anexado à Circular ABIFA Nº 36/97 -1º Semestre/1997.
- AMERICAN FOUNDRYMEN’S SOCIETY. **Recommended Practice for Sand Castings Aluminum and Magnesium Alloys - Chapter 4 – Magnesium Alloy Characteristics.** 2nd Edition, Des-Plaines, Illinois: A.F.S., 1965
- AMERICAN FOUNDRYMEN’S SOCIETY. **Recommended Practice for Sand Castings Aluminum and Magnesium Alloys - Chapter 6 – Magnesium Gating and Risering.** 2nd Edition, Des-Plaines, Illinois: A.F.S., 1965.
- AMERICAN FOUNDRYMEN’S SOCIETY. **Recommended Practice for Sand Castings Aluminum and Magnesium Alloys – Chapter 8 - Sand Practice for Magnesium Alloys.** 2nd Edition, Des-Plaines, Illinois: A.F.S., 1965.
- AMERICAN FOUNDRYMEN’S SOCIETY. **Recommended Practice for Sand Castings Aluminum and Magnesium Alloys - Chapter 10 – Magnesium Melting and Pouring.** 2nd Edition, Des-Plaines, Illinois: A.F.S., 1965.
- AMERICAN FOUNDRYMEN’S SOCIETY. **Recommended Practice for Sand Castings Aluminum and Magnesium Alloys - Chapter 06 – Magnesium Gating and Risering.** 2nd Edition, Des-Plaines, Illinois: A.F.S., 1965.
- A. J. MURPHY. **Non-Ferrous Foundry Metallurgy.** Pergamon Press, London, 1954.
- AMERICAN MAGNESIUM CORPORATION. **Designing with Magnesium,** CLEVELAND, OHIO: A.M.C., 1947.
- ASM. **Effect of Residual Elements on the Properties of Metals.** 12/1965. 47p.

- **ASM HANDBOOK. Corrosion Resistance of Magnesium Alloys.** Vol. 13A: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. Editado por Stephen D. Cramer e Bernard S. Covino, Jr. Ohio, 2003 1135P
- **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS. Fundição.** 10^a edição, São Paulo: A.B.M, 1978.
- **ASTM. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric].** Designation: E 8M-95, Jun95.
- **ASTM Standard Specification for Magnesium Alloys in Ingot Form for Sand Castings, Permanent Mold Castings, and Die Castings.** Designation B93/B93M-05
- **ASTM Standard Test Methods for Chemical Analysis of Magnesium and Magnesium Alloys.** Designation: E35-88, 1997
- **ASTM Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. Designation.** Designation: E3-95.
- **ASTM Standard Reference Radiographs for Inspection of Aluminum and Magnesium Castings.** Designation: E155, 1995.
- **AVEDESIAN, M. M., BAKER, H.: ASM Specialty Handbook - Magnesium and Magnesium Alloys.** Ohio: ASM International, 1999. 314p.
- **AWBERY, J. H., GRIFFITHS, E.** Proc. Phys. Soc. Lond. 1925/6 38 395.
- **BARÃO, A. S. Magnésio e Suas Ligas –** Publicação de Engenharia Industrial Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 1978.
- **BARÃO, A. S. Modelação – Curso de Fundição –** Publicação de Engenharia Industrial Metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 1980. p89-117.
- **BARRASS, Robert. Os Cientistas Precisam Escrever: Guia de Redação para Cientistas, Engenheiros e Estudantes.** (Scientists must write: a guide to better writing for scientists, engineers and students) Traduzido por Novaes, L. e Hegenberg, L.. São Paulo, S.P., Ed. da Universidade de São Paulo, 1979, 219p.;
- **BAUER, E., BRUNNER, R.** Helv. Chim. Acta 1934 17 958.
- **BEREZIN, ISAAC; SOUZA, SÉRGIO A. DE Fundição de Ligas de Magnésio em Areia.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Publicação 691,

- Separata da ABM, Boletim da Associação Brasileira de Metais, N^o 73, Vol 18, São Paulo, SP, 1962, p657-678.
- BRACE, A. W.; ALLEN, F.A. **Magnesium Casting Technology**. London: Chapman & Hall LTD, 1957, 174p.
 - BRIDMAN, P. W. Proc. Amer. Acad. Arts. Sci. 1931 (67) 29.
 - BROSCH, C. DIAS. **Areias de Fundição** – IPT Boletim n^o 44, Dez de 1952, São Paulo, SP.
 - BROSCH, C. D.; LO RÉ, V. **Areias de Fundição**. Bol 54, São Paulo: IPT dez 1965, Vol 44.
 - BUSK, R. S.; R. E. ANDERSON. Trans. A.I.M.E (1945), 161 (278)90.
 - CAILLON, A. **La Fonderie du Magnesium**. Publications Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Air, Service des Recherches de L'Aéronautique, Paris, 1933, 141p.
 - CATON, P. D. **Magnesium – An Old Material with New Applications**. Material & Design (1991) 12, 6, 309-316
 - CÂMARA, E. G.; SANTOS, P. R. G.; MONTENEGRO, D. P. **Possibilidades de Produção de Magnésio no Brasil**. 1^o Congresso Brasileiro de Fundição – ABIFA, nov. 1979.
 - CIZEK, L., GREGER, M., PAWLICA, L., DOBRZANSKI, L. A., TANSKI, T.. **Study of Selected Properties of Magnesium Alloy AZ91 After Heat Treatment and Forming**. Journal of Materials Processing Technology, 157-158. 2004, pp 466-471.
 - **CRC-Handbook of Chemistry and Physics**.. National Institute of Standards and Technology. 85th Edition – 2004-2005. David R. Lide – Ed Chief. Boca Raton, Fl – 2005.
 - DAHLE, A. K., ET AL. **Development of the As-Cast Microstructure in Magnesium-Aluminum**. Journal of Light Metals, 1, 2001, pp61-72.
 - D.R. Lide, (ed.) in ***Chemical Rubber Company handbook of chemistry and physics***, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 85th Edition, 2004-2005.
 - EMLEY, E. F. **Principles of Magnesium Technology**. London: Pergamon Press, 1966.

- EMLEY, E. F.; FISHER, P. A. **The Control of Quality of Magnesium – Base Alloy Casting.** J. of the Inst. of Metals (1957) 85 (6) 236
- FINARDI, J. **Ponto 6. - Especificações; Propriedades e Aplicações de Ligas de Magnésio Fundidas. Fundição de Ligas não Ferrosas.** 3ª edição, São Paulo: ABM, 1971.
- FOX, F. A.; E. LARDNER. J. of the Inst. of Metals (1943) 64, 373-96.
- FRANÇA, FERNANDO C. V.. **Produção e Demanda de Magnésio Metálico no Brasil.** Seminário de Magnésio e sua Utilização. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 1999.
- GREENFIELD, P. **Magnesium.** London Mills&Boon Ltd, 1972.
- GUY, A.G. **Ciência dos Materiais.** Tradução de José Roberto da Silva – Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980, 435p.
- GOUVEIA, J. A.; RAUTER, R. O.; VALERIANO, D. L.; RUIZ R.; PIRRÓ E LONGO, W. **Magnésio – Obtenção pelo Processo Pidgeon.** Vol. II, Escola Técnica do Exército, Rio de Janeiro – RJ. 1959.
- GUIMARÃES, C. E LO RÉ, V. **Processo de materiais de moldagem.** Publicação N° 646, IPT; Separata da ABM N° 63 – vol. 17, 1961.
- HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS. CRC Press. Ohio, Editor Robert C. Weast, Ph.D. 1974.
- HU, B. H., TONG, K. K., NIU, X. P., PINWILL, I. **Design and optimization of Runner and Gating Systems for the Die Casting of Thin-walled Magnesium Telecommunication Parts Through Numerical Simulation.** Journal of Materials Processing Technology, 105, 2000, pp 128-133.
- JIN, Q., EOM J., LIM, SU., PARK, WON., YOU B.. **Grain Refining Mechanism of a Carbon Addition Meted in an Mg-Al Magnesium Alloy.** Scripta Materialia, 49, 2003, pp 1129-1132.
- KLEINER, S., BEFFORT, O., WAHLEN, A., UGGOWITZER, P. J.. **Microstructure and Mechanical Properties of Squeeze Cast and Semi-Solid Cast Mg-Al Alloys.** Journal of Light Metals, 2, 2002, pp 277-280.

- KOREN, Z., RESENSON, H., GUTMAN, E. M., UNIGOVSKI, YA. B., ELIÉCER, A.. **Development of Semisolid Casting for AZ91 and AM50 Magnesium Alloys.** Journal of Light Metals, 2, 2002, pp 81-87.
- LEONTIS, T. E.; ELLIOTT, H. E. Trans A.I.M.E. (1951), 191, (2), 120-4.
- LO RÉ, V. E SOUZA, S. A. **Determinação das Características de uma Areia de Moldagem para Ligas de Magnésio.** Publicação N° 734 do IPT, Separata da ABM nº 79 - vol. 19, 1963.
- LÜ Y., WANG, Q., ZENG, X., DING, W., ZHAI C., ZHU, Y.. **Effects of Rare Earths on the Microstructure, Properties and Fracture Behavior of Mg-Al Alloys.** Materials Science and Engineering A278, 2000, pp 66-76.
- MAGNESIUM ELEKTRON LTD., M.E.L. **Elektron Magnesium Alloys.** Clifton Junction, Manchester, England, 1956.
- MAGNESIUM ELEKTRON LTD., M.E.L. **Operational Safety During the Melting and Handling Molten Magnesium,** brochure 602, Twickenham - England, 1977;
- MALTAIS, A., DUBÉ, D., Fiset, M., LAROCHE, G., TURGEON, S.. **Improvements in the Metallography of As-Cast AZ91 Alloy.** Materials Characterization, 52, 2004, pp 103-119.
- MARIOTTO, C. L. **Ponto 13. – Estudo das Areias para Confecção de Moldes e Machos; Composições; Propriedades e Aplicações, Métodos de Ensaio, etc. Fundição de Ligas não Ferrosas.** 3ª edição, São Paulo: ABM, 1971
- METALCASTER'S REFERENCE & GUIDE, 2nd ed. American Foundrymen's Society, Inc, Illinois, 1989; 647p.
- METALS HANDBOOK. **Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Pure Metals and Special Purpose Materials.** 10th Edition Materials Park, Ohio: American Society for Metal International, 1990. 1328p. Vol 2.
- METALS HANDBOOK. **Castings.** 9th Edition. Park Ohio: American Society for Metal, 1996. Vol 15.

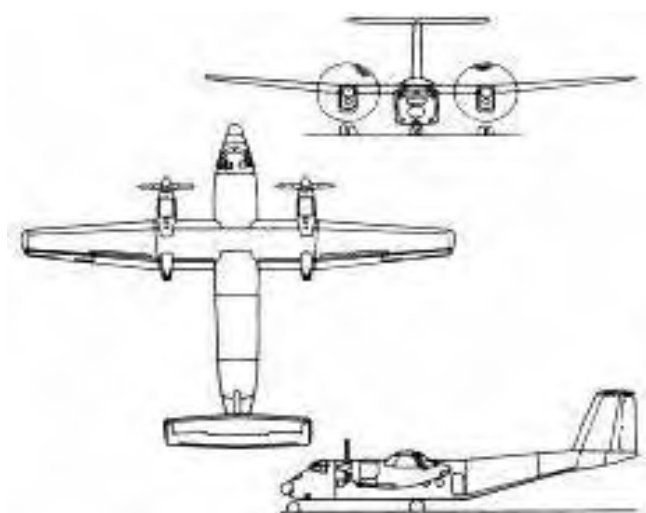
- **METAUX. Complements sur les Metaux et Alliages. Ch. 5 – Propriétés du Magnesium.** Tome II. Toulouse: Ecole Nationale Supérieure de L'Aeronautique et de L'Espace, 1973. p66-79.
- **MIL-STD-410. Nondestructive Testing Personnel Qualification and Certification.** Department of Defense, Washington, DC.
- **MIL-STD-453. Inspection, Radiographic.** Department of Defense, Washington, DC.
- **MIL-STD-2175. Castings, Classification and Inspection of.** Department of Defense, Washington, DC, Oct 84.
- **MORDIKE, B.L.,EBERT, T. Magnesium Properties – applications – potential.** Materials Science and Engineering A302 (2001) 37-45.
- **NORSK HIDRO. Sand and Gravity Die Casting.** Procedures, Oslo, Norway, 1971.
- **NORSK HIDRO. Melting Technique.** Procedures, Oslo, Norway, 1968.
- **PETTERSEN, G. et al. Characterization of the Surface Films Formed on Molten Magnesium in Different Protective Atmospheres.** Materials Science and Engineering, A332, 2002, pp 285-294.
- **PILLING, N. B.; BEDWORTH, R. E. The Oxidation of Metals at High Temperatures.** J. Inst. Metals, XXIX(1):529–591, 1923.
- **POLMEAR, I. J. Light Alloys – Metallurgy of the Light Metals.** 2nd edition, N.Y.: Edward Arnold, 1989.
- **POPPEMA, T. J.; JAEGER, F. M. Proc. Acad. Sci. Amst. 1935 38 514.**
- **RAYNOR, G. V. The Physical Metallurgy of Magnesium and its alloys.** Pergamon Press, London, 1959, 253p.
- **RAVI KUMAR, N. V., BLANDIM, J. J., SUÉRY, M. GROSJEAN, E.. Effect of Alloying Elements on the Ignition Resistance of Magnesium Alloys.** Scripta Materialia, 49 (2003), p225-230.
- **RECUSANI FILHO, A. Ponto 24. – Estudo das Operações de Vazamento. Desmoldagem e Rebarbação (Corte de Canais Limpeza e Acabamento). Fundição de Ligas não Ferrosas.** 3^a edição, São Paulo: ABM, 1971.

- RUDEN, T. J., ALBRIGHT, D. L.. **Magnesium Castings for Auto Applications**. Advanced Materials & Processes, Jun 1994, V145, n6, p28(5).
- SCHNEIDER, A., ESCH, V. Z. Elektrochem. 1939 45 888.
- SIMONS, E. N. **Guide to Uncommon Metals**. Ed. Frederick Muller Ltd, London, 1967, 244p.
- STANDARD SPECIFICATION FOR MAGNESIUM. **Alloys Sand Castings**. A.S.T.M., B 80-90, 1990.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, INC. **Whell and Break (Sand and Permanent Mold) Castings Minimum Requirements for Aircraft Applications**. AS586. Jan/2005.
- THE SAND CASTING MAGNESIUM ALLOYS. **The Metal Industry**. pag 226, abril de 1943.
- TROVANT, M., ARGYROPOULOS, s. A.. **Mathematical Modeling and Experimental Measurements of Shrinkage in the Casting of Metals**. Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 35, No 1, pp 75-84, 1996.
- WOLDMAN, N. E. **Magnesium Castings**. TWENTY-SEVENTH NATIONAL METAL CONGRESS AND EXPOSITION OF THE ASM, 1948, Cleveland. **Magnesium**. Cleveland: ASM, 1946. p47-110.
- www.magnesium.com/w3/data-bank/article.php?mgw=157&magnesium=78 ECONOMIC ASPECTS acessado em 25/05/2005.
- www.magnesium.com/w3/data-bank/index.php?mgw=153 MAGNESIUM ENCYCLOPEDIA - PROPERTIES acessado em 25/05/2005.
- www.matweb.com/search/SpecificMaterialPrint.asp?bassnum=MMAZ91CF MAGNESIUM AZ91C-F, CAST Acessado em 18/05/2005.
- <http://72.14.207.104/search?q=cache:7w2CvOs3i2EJ:www.mc.mat.shibaura-it.ac.jp/~master/online/online2001/200106/200106.html+KANAME+OGAWA+Hachirou+Imai+GRAIN+SIZE&hl=pt-BR> Acessado em 11/11/2005.

Apêndice A – Ficha Técnica do Buffalo C-115



C-115 (Buffalo)



Desenvolvido para ser um avião de característica STOL (*"Short Take Off and Landing"* / decolagem e pouso curtos), destinado a transporte de cargas, o Buffalo adaptou-se facilmente às necessidades da Força Aérea. Seu desempenho em pistas curtas é superior ao de qualquer outra aeronave de transporte em sua classe, com a mesma desenvoltura em extremos opostos de condições climáticas.

Utilizado como lançador de pára-quedistas e transporte de cargas leves, o Buffalo tornou-se imagem constante nas regiões mais remotas do País realizando missões de transporte de tropas, missões de transporte logístico e de ressuprimento para as unidades da FAB, do Exército e da Marinha do Brasil, principalmente na região amazônica, onde as características de pouso e decolagens curtas dessas aeronaves permitem operar em locais de difícil acesso, onde muitas vezes não existe uma pista para aeronaves do seu porte.

Atualmente em atividade no Primeiro Esquadrão do Nono Grupo de Aviação (1º/9º GAv), o Esquadrão Arara, criado provisoriamente na Base Aérea de Belém, foi transferido para sua sede definitiva, a Base Aérea de Manaus. O Esquadrão está subordinado a Quinta Força Aérea (V FAe) e atua em coordenação com o VII COMAR, que também tem sua sede em Manaus, e o COMARA, Comissão de Aeroportos da Região Amazônica. O Esquadrão Arara é a única unidade da Força Aérea Brasileira a operar as aeronaves De Havilland DHC-5 Buffalo, de fabricação canadense e designados na Força Aérea Brasileira como C-115 Buffalo. O Esquadrões Coral (1º/1º GTT) e o Esquadrão Onça (1º/15º GAv), operaram anteriormente essas aeronaves.

Equipados com dois turboélices General Electric CT64-820-1 com 2.970 shp e hélices Hamilton Standard de passo constante, o Buffalo tem uma capacidade de carga de 4.000 kg, podendo lançá-las em vôo através de sua rampa traseira. A sua velocidade não é considerada alta, mas a sua robustez e autonomia favorecem a sua operação em regiões como a Amazônia, onde grandes distâncias precisam ser superadas.

Ficha Técnica	
País de origem:	CANADÁ
Fabricante:	De Havilland Canadá
Tipo:	Transporte de tropas e cargas leves
Motores:	2 (G E Turboélice CT64-820-1 de 3.055 SHP)
Desempenho	
Vel. máxima:	435 km/h
Vel. máx. cruzeiro:	420 km/h a 3.050 m
Alcance:	1.112 km (8.164kg)
Peso	
Vazio:	10.505 kg
Máx. decolagem:	18.598 kg
Dimensões	
Envergadura:	29,26 m
Comprimento:	24,08 m
Altura:	8,73 m
Área de asa:	87,8 m ²
Tripulação:	4 (além de 41 soldados ou 34 pára-quedistas ou 24 macas e 6 médicos)
Operadores:	Brasil, Birmânia, República dos Camarões, Canadá, Equador, Egito, Etiópia, México, Peru, Sudão, Tanzânia, Togo, Estados Unidos, Zaire, Zâmbia, Quênia, Oman, Maurício, Emirados Árabes Unidos.

APÊNDICE B – PROCEDIMENTO DO ENSAIO RADIOGRÁFICO

	ENSAIO RADIOGRÁFICO EM SEMI- CUBO DE RODA DE MAGNÉSIO	ME-AMR-L 001/82
	Método de Ensaio	Rev. 01

SUMÁRIO

1	Objetivo
2	Documentos aplicáveis
3	Definições
4	Requisitos gerais
5	Aparelhagem e produtos
6	Execução do ensaio
7	Registro dos resultados
8	Limite de aceitação e rejeição
	ANEXOS Folha de Registro de Ensaio Radiográfico
	ÍNDICE ALFABÉTICO

1. OBJETIVO

Este método prescreve as condições técnicas a serem aplicadas no ensaio radiográfico de semi-cubos de roda de magnésio, fundidos em areia, utilizados nas aeronaves C-155.

2. DOCUMENTOS APLICÁVEIS

Os seguintes documentos fazem parte deste método de ensaio, portanto na aplicação do mesmo faz-se necessário consultá- lo:

Military

MIL- STD- 410	Non Destructive Testing Personnel Qualification and Certification
MIL- STD- 453	Inspection, Radiographil
MIL- STD- 2175	Castings, Classification and Inspection of

American Society for Testing and Materials- ASTM

E- 155 Reference Radiographs for Inspection of Aluminium and Magnesium Castings

3. DEFINIÇÕES

Para os efeitos deste método são adotadas as definições de 3.1 a 3.7.

3.1 Método de ensaio

Tipo de norma que se destina a prescrever a maneira de verificar ou determinar características, condições ou requisitos exigidos:

- a) de um material ou produto, de acordo a respectiva especificação;
- b) de uma obra, instalação, de acordo com o respectivo projeto

3.2 Identificação do semi- cubo

Conjunto de dados impressos no semi- cubo, fornecendo, pelo menos as seguintes informações: número do semi- cubo, corrida, lote, data da fusão e nome do fabricante.

3.3 Semi- cubo

Parte metade de um cubo de roda, podendo ser o macho ou fêmea, indistintamente.

3.4 Semi- cubo universal

Semi- cubo que ainda não sofreu usinagem para obtenção das dimensões finais.

3.5 Semi- cubo macho

Semi- cubo que, após a usinagem final apresenta furo para colocação da válvula pneumática ou válvula de enchimento do pneu.

3.6 Semi- cubo fêmea

Semi- cubo que, após a usinagem final não apresenta furo para colocação da válvula pneumática.

3.7 Cubo de roda

Montagem, constituída de um semi- cubo de roda fêmea com um macho, fixados através de parafusos.

4. REQUISITOS GERAIS

4.1 Condição superficial

Todas as superfícies do semi- cubo, devem estar isentas de quaisquer imperfeições que interfiram na interpretação das radiografias, tais como: inclusões de areis, enxofre, sais, graxa, etc. Recomenda-se efetuar uma pré- usinagem para limpeza das superfícies antes de se dar início ao ensaio, tomando-se cautela para que não seja removida toda a camada de sobre metal.

4.2 Condição para posicionamento

Todas as partes provenientes do processo de fundição que não façam parte do projeto do semi- cubo, tais como: massalotes, canais, rebarbas, resfriadores, etc, devem ser removidas para possibilitar um adequado posicionamento da peça/ filme em relação ao foco do aparelho de raios-x.

4.3 *Identificação*

O semi- cubo ao deixar a fundição deve possuir uma identificação permanente, com as informações conforme descrito no parágrafo 3.2.

5. APARELHAGEM E PRODUTOS

Os aparelhos e produtos utilizados pela seção de Ensaios não Destrutivos da Divisão de Materiais do IAE/ CTA estão listados a seguir. Outros aparelhos e produtos poderão ser empregados, desde que satisfaçam os requisitos da norma MIL-STD- 453.

- equipamento de raios- x: CMA 20 Andrex (200 Kv).
- negatoscópio: Tauros Korco.
- tipo de filme : ASTM Tipo I (Kodak M-5).
- tela intensificadora: "écran" 0,010" posterior.
- revelador: Kodak.
- fixador: Kodak.
- densitômetro: Industrial X-Ray Density Estimator- Dupont.

6. EXECUÇÃO DO ENSAIO

6.1 *Regiões a serem inspecionadas*

6.1.1 As regiões que deverão sofrer inspeção são as seguintes: banda, flange, furos de fixação, furos de alívio e chavetas. As figuras 1, 2, 3, 4 e 5 a seguir mostram a localização das regiões em um semi- cubo.



Figura 1. Fotografia FC 3/93 Pos 8. Mostra a localização da banda (seta) em um semi- cubo.



Figura 2 Fotografia FC 3/93 Pos 9. A seta indica a posição da flange em semi- cubo.



Figura 3. Fotografia FC 3/93. Pos. 10. Localiza a posição da região dos furos de fixação em um semi-cubo.



Figura 4. Fotografia FC 3/93. Pos. 11. Mostra a região denominada como furos de alívio em um semi-cubo.

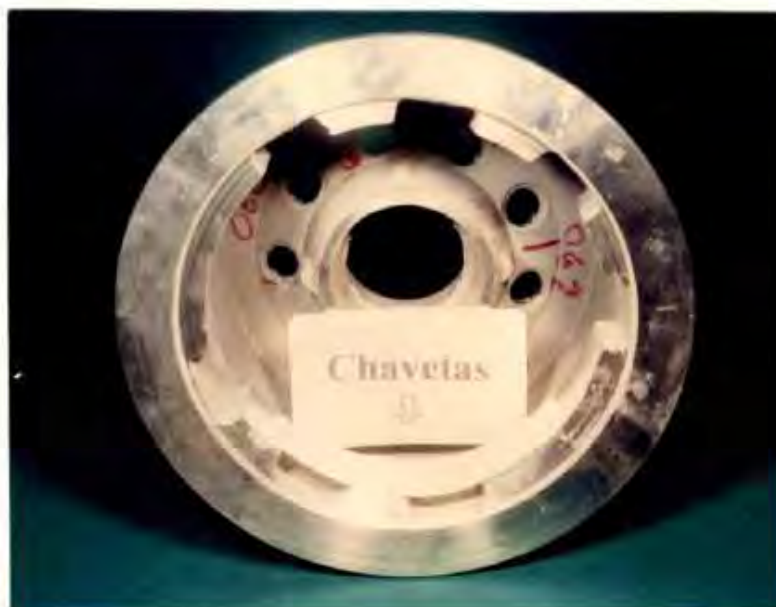


Figura 5. Fotografia . FC 3/93. Pos. 12. Indica (seta) o posicionamento das chavetas em um semi-cubo.

6.2 *Parâmetros radiográficos*

6.2.1 *Características radiográficas*

Os parâmetros de exposição e as condições de processamento do filme devem ser controlados de tal forma que produzam as seguintes características radiográficas:

- a) nível de qualidade radiográfica 2- 1T para as regiões consideradas críticas à fratura, no caso banda e flange, e 2- 2T para as demais
- b) densidade radiográfica de 2,0 a 2,4 nas áreas de interesse e na imagem do penetrâmetro, observando- se sempre a diferença mínima de densidades mostrada na figura 4, pág. 19 da norma MIL-STD-00453.

6.2.2 *Parâmetros utilizados*

Os parâmetros utilizados pelo laboratório de Ensaios Não Destrutivos- AMR, foram extraídos da curva de exposição do magnésio confeccionada a partir do aparelho de raios- x CMA- 20 e estão apresentados na TABELA I a seguir:

**Tabela I- Parâmetros de Ensaio Radiográfico do
Semi- cubo de Magnésio da Anv.C 115**

Região	Tempo (min)	Kilovoltagem	Distância foco- filme (cm)	Miliamperagem
Banda	1:10	100	96	5
Flange	2:30	100	96	5
Furos de Fixação	2:50	100	96	5
Furos de Alívio	1:20	100	96	5
Chavetas	2:40	100	96	5

Obs. os parâmetros constantes na Tabela I, podem diferir, conforme o equipamento utilizado, para que se obtenha uma densidade em torno de 2,0.

6.3 *Posicionamento do semi- cubo e filme em relação ao foco do aparelho*

A peça deverá ser radiografada por partes, tendo em vista sua geometria e variações de espessuras. Tanto o filme quanto a região a ser ensaiada, deverão estar posicionados de tal maneira, que sofram a incidência do feixe de radiação com a maior perpendicularidade possível. A figura 5 mostra o posicionamento para a obtenção da radiografia da banda.



Figura 5. Fotografia FC 3/93. Pos. 21. Mostra o arranjo tubo/ peça/ filme, objetivando a radiografia da banda.

7. REGISTRO DOS RESULTADOS

As possíveis descontinuidades detectadas em um semi- cubo, através do ensaio radiográfico deverão ser registradas em uma Folha de Registro de Ensaio Radiográfico (ANEXO I), assim como seus respectivos níveis de severidade. Toda informação relevante, com respeito ao semi- cubo ensaiado deverá ser também motivo de registro.

8. LIMITE DE ACEITAÇÃO E REJEIÇÃO

Ficou estabelecido que os semi- cubos fundidos em magnésio e pertencentes à aeronave C- 115 devem ser classificados como Classe I, de acordo com a norma MIL-C-2127, portanto, cada fundido deve ser completamente examinado e possuir um nível de severidade de descontinuidade menor ou equivalente ao mostrado na TABELA II.

Tabela II- Níveis de severidade máximo de descontinuidades permissíveis em cada região de um semi- cubo

TIPO DE DESCONTINUIDADE	REGIÃO DO SEMI- CUBO				
	BANDA	CHAVETAS	FLANGE	FUROS DE FIXAÇÃO	FUROS DE ALÍVIO
Bolha de gás	1	1	1	3	2
Segregação	1	1	1	2	2
Cavidade de contração		NÃO	UTILIZÁVEL		
Micro contração (feather)	2	2	1	3	2
Micro contração (sponge)	2	2	2	3	2
Material estranho (menos denso)	2	2	2	3	2
Material estranho (mais denso)	1	1	1	2	2
Trincas	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma
Junta fria	"	"	"	"	"
Irregularidades superficiais	(a)	(a)	(a)	(a)	(a)

(a) admissível desde que não comprometam as tolerâncias do projeto ou usinagem final.

ÍNDICE ALFABÉTICO

Aparelhagem e produtos	5.
Características radiográficas	6.2.1
Condição para posicionamento	4.1
Condição superficial	4.2
Cubo de roda	3.7
Definições	3.
Documentos aplicáveis	2.
Execução do ensaio	6.
Identificação	4.3
Identificação do semi- cubo	3.2
Limite de aceitação e rejeição	8.
Método de ensaio	3.1
Objetivo	1.
Parâmetros radiográficos	6.2
Parâmetros utilizados	6.2.2
Posicionamento do semi- cubo e filme em relação ao foco do aparelho	6.3
Registro dos resultados	7.
Regiões a serem inspecionadas	6.1
Semi- cubo	3.3
Semi- cubo fêmea	3.6
Semi- cubo macho	3.5
Semi- cubo universal	3.4

APÊNDICE C – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA AREIA BASE DE MOLDAGEM - MÉTODO DE ENSAIO IPT M-34

- Peso total da Amostra - Areia seca em estufa – 50g

Peneira nº	Peso Retido	% Retido	Coefficiente	Produto
12	0,00	0,00	5	0,00
20	0,00	0,00	10	0,00
30	0,00	0,00	20	0,00
40	0,04	0,08	30	2,4
50	0,18	0,36	40	14,40
70	0,32	0,64	50	32,00
100	17,08	34,16	70	2391,2
140	22,06	44,12	100	4412,0
200	7,54	15,08	140	2111,2
270	1,80	3,60	200	720,0
Fundo	0,18	0,36	300	108
Soma	49,20	98,40	--	9791,2

- Peso total da areia sem argila (seca) – 49,2g
- Cálculo do % de argila:

$$\% \text{ de argila} = \frac{(50 - 49,2)}{50 * 100} = 1,6$$

- Cálculo do Módulo de Finura:

$$MF = \frac{979 * 1,2}{98,40} = 99,50$$

- Distribuição Granulométrica - 96,965%