

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Dalmarino Setti

**MÉTODO MULTICRITERIAL PARA  
SELEÇÃO DE PROCESSOS DE FUNDIÇÃO  
DE METAIS**

Porto Alegre, 2010

Dalmarino Setti

## **Método Multicriterial para Seleção de Processos de Fundição de Metais**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, na área de Sistemas de Qualidade.

Orientadora: Carla Schwengber ten Caten,  
Dra.

Porto Alegre

2010

Dalmarino Setti

## **Método Multicriterial para Seleção de Processos de Fundição de Metais**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

**Profa. Carla Schwengber ten Caten, Dra.**

Orientadora PPGEP/UFRGS

---

**Profa. Carla Schwengber ten Caten, Dra.**

Coordenadora PPGEP/UFRGS

### **Banca Examinadora:**

Professor Ivanir Luiz de Oliveira, Dr. (UTFPR-PG)

Professor Jaime Alvares Spim, Dr. (UFRGS)

Professor José Luis Duarte Ribeiro, Dr. (UFRGS)

Dedico esta tese:

A minha esposa Luiza, pelo incentivo, e a compreensão de todos os momentos.

A minha filha Fabiane, por todo o tempo que não podemos permanecer juntos.

## AGRADECIMENTOS

A minha orientadora professora Dra. Carla Schwengber ten Caten, pela confiança, respeito e auxílio ao longo de toda esta jornada.

Ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia de Produção da UFRGS, pela capacitação e auxílio sempre, quando necessário.

Aos especialistas que prestaram informações a respeito dos critérios ambientais e aos especialistas que realizaram a validação do método, o meu especial agradecimento pelo tempo que dispuseram e pela colaboração decisiva neste trabalho.

A equipe diretiva da UTFPR campus Pato Branco pelo apoio e suporte ao desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Professores da área de mecânica da UTFPR *campus* Pato Branco, pelo suporte e incentivo.

Aos meus amigos pela ausência dos últimos anos.

Por fim a todos os meus colegas de doutorado pelo companheirismo e incentivo.

**“Mas o princípio criativo reside na Matemática. Em certo sentido, portanto, defendo que o pensamento puro pode entender a realidade, como sonhavam os antigos.”**

**Albert Einstein, (1879-1955)**

## RESUMO

O objetivo principal da tese foi desenvolver um método multicritério de seleção de processos de fundição de metais (MMSPF) para fabricação de componentes, considerando-se critérios técnicos, ambientais e econômicos para ser aplicado nas fases iniciais do desenvolvimento do componente. O MMSPF é constituído pelos módulos de seleção técnica e econômica. O módulo de seleção técnica é destinado a antecipar as atividades de seleção de processos, a serem desenvolvidas na fase de projeto preliminar, enquanto o módulo de seleção econômica é destinado a antecipar as atividades de seleção de processos, necessárias à fase de projeto detalhado. O MMSPF realiza a seleção de processos de forma sequencial. Inicialmente, avaliando aspectos técnicos e, posteriormente, considerando aspectos econômicos. O MMSPF contempla as seis classes de ligas metálicas mais utilizadas na produção de componentes fundidos: aços, ferros fundidos, ligas de alumínio, ligas de cobre, ligas de magnésio e ligas de zinco, apropriadas aos processos de fundição de metais destinados à produção de peças. O MMSPF contempla os quinze principais processos de fundição de metais destinados a produção de peças: areia verde – manual (P1), areia verde – mecanizada (P2), areia verde – automatizada (P3), areia silicato - CO<sub>2</sub> (P4), areia com resina – cura frio (P5), areia com resina – *shell molding* (P6), processo molde de gesso – *plaster molding* (P7), processo molde cerâmico (P8), *investment casting* (P9), molde cheio - *lost foam* (P10), fundição centrífuga - molde metálico (P11), molde permanente – gravidade (P12), molde permanente - baixa pressão (P13), fundição sob pressão - *die casting* (P14) e *squeeze casting* (P15) como conjunto solução da seleção. As inovações propostas pelo MMSPF foram: (i) consolidação das diferentes fontes de informação dos processos a serem utilizadas no MMSPF, por meio de uma função de agregação; (ii) utilização de aspectos ambientais como critérios para seleção de processos de fundição de metais; (iii) consideração da estimação de custos de fabricação para realizar a seleção de processos de fundição de metais a partir de um índice de custo de fabricação, relativo ao desempenho técnico. Também foi desenvolvido um aplicativo computacional para implementar o MMSPF composto por três elementos principais: um *software* de planilha eletrônica (Microsoft Excel), no qual são realizadas todas as operações matemáticas necessárias ao desenvolvimento das etapas operacionais do MMSPF; um banco de dados, o *software* livre SQLite, responsável por armazenar as informações utilizadas no aplicativo computacional do MMSPF; e a interface gráfica do usuário, que atua como elemento de conexão entre o banco de dados, o *software* de planilha eletrônica e o usuário.

Palavras-chave: Fundição de metais. Seleção de processos. Decisão multicritério discreta.

## ABSTRACT

The main objective of this thesis was to develop a Multi-criteria Method for metal Casting Process Selection (MMCPS) to manufacturing components, considering technical criteria, environmental and economic to be applied in the early stages of design of the component. The MMCPS consists modules for the technical and economic selection. The technique selection module is designed to anticipate the activities of processes selection to be developed in the embodiment design, while the economic selection module is designed to anticipate selection process activities, necessary the detailed design phase. The MMCPS conducts the selection process sequentially. Initially, evaluating technical aspects and, subsequently, considering economic aspects. The MMCPS includes the six classes of metal alloys more used in the production of cast components: steel, cast iron, aluminum alloys, copper alloys, magnesium alloys and zinc alloys, suitable for metal shape casting processes. The MMCPS covers the fifteen main metal shape casting processes: green sand – hand molding (P1), green sand – mechanized molding (P2), green sand - automatic molding (P3), silicate-CO<sub>2</sub> (P4), air-set/nobake (P5), shell molding (P6), plaster molding (P7), ceramic mold (P8), investment casting (P9), lost foam (P10), centrifugal casting – metallic mold (P11), permanent mold-gravity (P12), permanent mold-low pressure (P13), die casting (P14) and squeeze casting (P15) as the set solution for the selection process. The innovations proposed by MMCPS were: (i) consolidation of different sources of information processes to be used in MMCPS through an aggregation function; (ii) use of environmental aspects as criteria for selection of metal casting processes; (iii) consideration of the cost estimation of manufacturing to make the metal casting process selection from an index of manufacturing cost on the technical performance. Also developed a computational tool to implement the MMCPS composed of three main elements: a spreadsheet software (Microsoft Excel), which are held every mathematical operations necessary for the development of operational steps MMCPS; a database, freeware SQLite, responsible for storing information used in the application of computational MMCPS, and the graphical user interface, which acts as a link between the database, the spreadsheet software and the user.

**Keywords:** Metal casting. Process selection. Multi-criteria decision-making.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas da pesquisa com as respectivas atividades realizadas.....	6
Figura 2 – A taxonomia dos processos de fabricação.....	9
Figura 3 – Principais etapas do desenvolvimento e da produção de componentes obtidos por processos de fundição de metais.....	12
Figura 4 – Classificação dos processos de fundição de peças.....	14
Figura 5 – Destino da produção do setor de fundição brasileiro em 2008.....	19
Figura 6 – Parâmetros da seleção de processos de fundição e suas interações no <i>Casting Process Selector</i> .....	38
Figura 7 – Hierarquia do processo de decisão do método AHP.....	46
Figura 8 – Custo versus pressão de fundição como obtido pelo MTC para fundição de rodas de alumínio.....	53
Figura 9 – Escopo das atividades desenvolvidas pelo MMSPF no âmbito de seleção de processos que ocorre nas fases de desenvolvimento de novos componentes.....	57
Figura 10 – Módulos e etapas operacionais do MMSPF.....	58
Figura 11 – Capacidade do processo na forma de função de pertinência.....	62
Figura 12 – Valores atribuídos às variáveis linguísticas utilizadas no MMSPF.....	63
Figura 13 – Arquitetura do aplicativo computacional do MMSPF.....	80
Figura 14 – Planilha eletrônica da etapa de separação inicial do MMSPF.....	81
Figura 15 – Interface gráfica do usuário da etapa de separação inicial do MMSPF.....	82
Figura 16 – Codificação da conexão entre a planilha eletrônica com a interface gráfica da etapa de separação inicial.....	83
Figura 17 – Tela inicial da ferramenta computacional do MMSPF.....	84
Figura 18 – Interface gráfica do usuário com o botão <i>base de dados</i> acionado.....	85
Figura 19 – Componente automotivo utilizado na apresentação do aplicativo computacional do MMSPF.....	86
Figura 20 – Interface gráfica da etapa operacional de separação inicial, com as informações do componente à esquerda e os resultados apresentados à direita.....	87
Figura 21 – Interface gráfica da etapa operacional peso dos critérios, com o aviso de julgamentos inconsistentes dos grupos de critérios acionado.....	88
Figura 22 – Interface gráfica da etapa operacional dos pesos dos grupos de critérios, com o resultado dos julgamentos consistente.....	89
Figura 23 – Interface gráfica da etapa operacional peso dos critérios, com o resultado de todos os pesos dos critérios determinados.....	90
Figura 24 – Interface gráfica da etapa operacional de classificação técnica, com o resultado.....	91
Figura 25 – Interface gráfica da etapa operacional de estimação de custo.....	92
Figura 26 – Interface gráfica da etapa operacional de avaliação econômica com o resultado final da seleção do processo de fundição do componente em análise.....	97
Figura 27 – Instrumento de validação do MMSPF, rotor de bomba centrífuga: componente de aplicação dois.....	110
Figura 28 – Resultados do índice de Williams apresentado pelo grupo de especialistas para os oito componentes de aplicação.....	113
Figura 29 – Resultados do índice de Williams apresentado pelo MMSPF com pesos do cenário 5 em relação ao grupo de especialistas para os oito componentes.....	115

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores do índice RI para diferentes tamanhos de matrizes.....	48
Quadro 2 – Valores do índice HRI para diferentes tamanhos de matrizes.....	49
Quadro 3 – Processos de fundição de metais contemplados no MMSPF e respectivas ligas processadas.....	61
Quadro 4 – Resultados da etapa de separação inicial do MMSPF para os oito componentes com os critérios responsáveis pela eliminação.....	98
Quadro 5 – Peso dos critérios para os diferentes cenários.....	102
Quadro 6 – Resultados da classificação técnica em função da variação dos pesos dos critérios.....	102
Quadro 7 – Resultados do módulo de seleção econômica para o cenário cinco.....	107
Quadro 8 – Resultados da validação do módulo de seleção técnica do MMSPF.....	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais metais fundidos, com suas características e aplicações.....	20
Tabela 2 – Maiores produtores mundiais de fundidos com a produtividade de cada país.....	20
Tabela 3 – Principais trabalhos sobre seleção de processos de fabricação.....	23
Tabela 4 – Principais métodos de seleção de processos de fundição de metais.....	35
Tabela 5 – Critérios adotados no trabalho de Akarte <i>et al.</i> (1999) para seleção de processos de fundição.....	36
Tabela 6 – Critérios utilizados na classificação do CACPS.....	41
Tabela 7 – Semântica da escala de Saaty.....	47
Tabela 8 – Valores de RC em função do tamanho da matriz.....	49
Tabela 9 – Métodos de avaliação de custos e sua imprecisão.....	52
Tabela 10 – Requisitos do componente em análise utilizados no módulo de seleção técnica.....	61
Tabela 11 – Critérios utilizados na separação inicial.....	65
Tabela 12 – Critérios utilizados na classificação técnica.....	66
Tabela 13 – Escala de comparação para preferências do decisor.....	67
Tabela 14 – Faixa de valores para o fator de perda associada a fusão, vazamento e rebarbação.....	73
Tabela 15 – na fusão em relação ao metal e ao tipo de forno, percentual de utilização do forno e fator de perda de fusão adotado no cálculo do coeficiente de material direto.....	73
Tabela 16 – Coeficiente de material direto para os processos de fundição de metais e para as diferentes ligas contempladas no MMSPF.....	75
Tabela 17 – Coeficiente do molde para os processos de fundição de metais contemplados no MMSPF.....	75
Tabela 18 – Informações utilizadas na aplicação da equação (8), a qual é utilizada na apuração do coeficiente de energia.....	76
Tabela 19 – Coeficiente de energia para as diferentes ligas e processos de fundição contemplados no MMSPF.....	77
Tabela 20 – Coeficiente de processamento para os processos de fundição de metais contemplados no MMSPF.....	78
Tabela 21 – Informações do componente utilizado no exemplo realizado pelo aplicativo.....	86
Tabela 22 – Caracterização dos componentes para aplicação do MMSPF.....	96
Tabela 23 – Informações dos componentes utilizados na aplicação do MMSPF.....	96
Tabela 24 – Número de processos eliminados conforme critério de separação para cada componente de aplicação.....	97
Tabela 25 – Compatibilidade técnica dos processos de fundição de metais em relação aos componentes de aplicação.....	104
Tabela 26 – Resultados para a etapa de classificação técnica fornecidos pelos especialistas e pelo aplicativo do MMSPF com base no cenário cinco.....	112
Tabela 27 – Resultados para a etapa de classificação técnica fornecidos pelos especialistas e pelo aplicativo do MMSPF com base no cenário cinco.....	117

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 O TEMA E SUA RELEVÂNCIA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo Geral.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.2.3 Justificativa dos Objetivos.....	3
1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	4
1.3.1 Classificação da Pesquisa.....	4
1.3.2 Etapas da Pesquisa.....	5
1.4 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	7
1.5 ESTRUTURA DA TESE.....	7
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	9
2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	9
2.1.1 Definição e Classificação.....	9
2.1.2 Processo de Fundição de Metais.....	10
2.1.3 Classificação dos Processos de Fundição de Metais.....	13
2.1.4 Processos de Fundição que Utilizam Areia na Confeção do Molde.....	15
2.1.5 Aplicações e Produção de Componentes Fundidos.....	18
2.1.6 Fundições.....	21
2.2 SELEÇÃO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	23
2.2.1 Principais Elementos da Seleção Processos.....	24
2.2.2 Seleção de Processos nos Estágios Iniciais do Projeto.....	26
2.2.3 Seleção de Processos na Etapa de Planejamento do Processo.....	29
2.2.4 Seleção de Processos na Etapa de Produção.....	32
2.2.5 Considerações Sobre Seleção Processos de Fabricação.....	34
2.3 SELEÇÃO DE PROCESSOS DE FUNDIÇÃO DE METAIS.....	34
2.3.1 Método de Sirilertworakul, Webster e Dean (1993).....	35
2.3.2 Método de Darwish e El-Tamimi (1996).....	35
2.3.3 Método de Akarte, Ravi e Creese (1999).....	36
2.3.4 Método de Er e Dias (2000).....	37
2.3.5 Método de Karthik, Chung, Ramani e Tomovic (2003).....	39
2.3.6 Método de Allison, Li, Wolverson e Su (2006).....	40
2.3.7 Método de Akarte e Ravi (2007).....	40
2.3.8 Método de Daws, Al-Dawood e Al-Kabi (2008).....	41
2.3.9 Considerações sobre Métodos de Seleção Processos de Fundição de Metais.....	42
2.4 PRINCIPAIS FERRAMENTAS UTILIZADAS NA SELEÇÃO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	43
2.4.1 Análise de Decisão Multicritério.....	43
2.4.2 Método Hierárquico Analítico de Decisão Multicritério <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP).....	45
2.4.3 Modelamento Técnico de Custo.....	52
<b>3 MÉTODO MULTICRITERIAL PARA SELEÇÃO DE PROCESSOS DE FUNDIÇÃO DE METAIS</b> .....	57
3.1 ESCOPO DE APLICAÇÃO E ESTRUTURA DO MÉTODO.....	57
3.2 MÓDULO DE SELEÇÃO TÉCNICA.....	60
3.2.1 Informações Utilizadas no Módulo de Seleção Técnica.....	60

3.2.1.1	Requisitos do componente.....	60
3.2.1.2	Informações dos processos de fundição de metais.....	61
3.2.2	Tratamento das Informações da Base de Dados.....	63
3.2.3	Separação Inicial.....	64
3.2.4	Determinação dos Pesos dos Critérios de Classificação Técnica.....	66
3.2.5	Classificação Técnica.....	68
3.3	<b>MÓDULO DE SELEÇÃO ECONÔMICA.....</b>	<b>69</b>
3.3.1	Determinação do Modelo de Estimação de Custo.....	69
3.3.2	Determinação dos Coeficientes do Modelo de Estimação de Custo.....	72
3.3.2.1	Coeficiente de material direto.....	73
3.3.2.2	Coeficiente do Molde.....	75
3.3.2.3	Coeficiente de energia.....	76
3.3.2.4	Coeficiente de processamento.....	77
3.3.3	Avaliação Econômica.....	78
4	<b>APLICATIVO COMPUTACIONAL DO MMSPF.....</b>	<b>80</b>
4.1	ARQUITETURA DO APLICATIVO COMPUTACIONAL DO MMSPF.....	80
4.2	DEMONSTRAÇÃO DO APLICATIVO COMPUTACIONAL DO MMSPF.....	84
5	<b>APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MMSPF.....</b>	<b>95</b>
5.1	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES E DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE INFORMAÇÃO.....	95
5.1.1	Descrição dos componentes utilizados na aplicação e dos parâmetros para o tratamento das informações.....	95
5.2	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÓDULO DE SELEÇÃO TÉCNICA DO MMSPF.....	97
5.2.1	Resultados da Etapa de Separação Inicial.....	97
5.2.2	Resultados da Etapa de Classificação Técnica.....	100
5.3	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÓDULO DE SELEÇÃO ECONÔMICA DO MMSPF.....	106
5.4	VALIDAÇÃO DO MMSPF.....	109
5.4.1	Validação do Módulo de Seleção Técnica do MMSPF em Relação ao Grupo de Especialistas.....	112
5.4.2	Validação do Módulo de Seleção Econômica do MMSPF em Relação ao Grupo de Especialistas.....	116
	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>119</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>123</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>135</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>149</b>
	<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>158</b>
	<b>APÊNDICE D.....</b>	<b>163</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A fundição de metais consiste no vazamento de metal líquido para um molde com a forma do componente a ser fabricado e, após a solidificação, remover o componente metálico do molde (GLOWNIA, 1993; KAY, 2004; GROVER, 2007; KALPAKJIAN e SCHMID, 2009). Existem muitos processos de fundição de metais. O que diferencia um processo do outro é o material utilizado na confecção do molde, tipo de ferramental e a quantidade de pressão empregada para preencher o molde com metal fundido (KAY 2004). A fundição de metais é um dos modos mais simples, direto e de menor custo para obterem-se produtos metálicos de forma definida (RUNDMAN, 1999). De acordo com o *Department of Energy* (2004) componentes fundidos são encontrados em 90% dos produtos manufaturados e equipamentos. Aplicações que vão desde simples utensílios domésticos, às mais complexas peças de automóveis e aviões.

De acordo com Grover (2007), entre as capacidades e vantagens apresentadas pelos processos de fundição de metais destacam-se: (i) criação de componentes com geometria complexa, tanto para formas internas quanto externas; (ii) capacidade de produzir componentes de grande porte: componentes fundidos de mais de 100 toneladas já foram produzidos; (iii) capacidade de produzir componentes na forma final, sem a necessidade de qualquer operação complementar para obter-se a geometria ou dimensões do componente; (iv) processos de fundição podem ser aplicados a qualquer metal que possa ser fundido; (v) alguns processos de fundição são adequados à produção em massa. As vantagens apresentadas pelos processos de fundição de metais proporcionaram a base para o crescimento de um amplo segmento industrial (BEELEY, 2001).

Em virtude de sua importância industrial, algumas áreas de pesquisa destacam-se em termos de processo de fundição de metais, tais como: (i) otimização de parâmetros de processos (Vijian e Arunachalam (2007) e Chiang *et al.* (2007)); (ii) controle de qualidade das ligas (Sun *et al.* (2008)); (iii) modelamento físico do preenchimento do molde e da solidificação do componente (Liu *et al.* (2007), Tavakoli e Davami (2007), Gustafsson e Strömberg (2008) e Holmström *et al.* (2008)); (iv) seleção de processos (Akarte e Ravi (2007) e Daws *et al.* (2008)).

A seleção de processos de fundição de metais é uma área de pesquisa importante sob aspectos relativos à redução de custos e aumento de competitividade, redução dos tempos de desenvolvimento de novos produtos, aumento da qualidade dos componentes fundidos e para a melhoria da sustentabilidade dos processos de fundição de metais. Segundo Lovatt e

Shercliff (1998a), a seleção de um processo adequado de produção, em muitas situações, envolve uma complexa interação entre características do componente, do material e do processo. A seleção de processos de fundição de metais se enquadra nesta situação complexa onde as estratégias de seleção precisam ser mais refinadas para que os resultados obtidos sejam satisfatórios.

## 1.1 TEMA E SUA RELEVÂNCIA

O tema proposto para esta tese é a seleção processos de fundição de metais, podendo a importância do tema ser justificada em relação aos seguintes aspectos:

Competitividade de custo, a indústria de fundição por ser uma fornecedora primária é um elo importante da cadeia de suprimentos para uma série de segmentos industriais, em especial para indústria automotiva (MAIA *et al.*, 2005). Deste modo, o desempenho das fundições em relação ao custo pode afetar a competitividade de produtos que utilizam componentes fundidos. Nesta perspectiva, a escolha do processo mais adequado é um fator primordial para a redução de custos de fabricação.

Desenvolvimento tecnológico necessário à indústria de fundição brasileira para enfrentar uma competição cada vez mais acirrada na economia globalizada. O Brasil ocupa uma posição de destaque em relação à produção de fundidos. É o sétimo maior produtor mundial (MODERN CASTING, 2009). O desenvolvimento de pesquisa aplicada na área de seleção de processos de fundição de metais é uma alternativa viável para melhorar a produtividade da indústria de fundição brasileira e aumentar a sua competitividade.

A preocupação com o meio ambiente é um fator importante na indústria de fundição (HOLMGREN, 2004; MAHANTI *et al.*, 2004). Neste aspecto, a seleção de processos de fundição é um ponto chave para minimizar os impactos ambientais causados por este tipo de atividade, pois processos com melhor desempenho ambiental podem ser preferidos em relação a outros menos eficientes ambientalmente.

Melhoria da qualidade do componente fundido sem custo adicional. Iniciativa sistematicamente adotada pelas fundições, pode ser potencializada pela correta seleção do processo de fundição (VIJAYARAM *et al.*(2006).

A redução dos índices de refugos, é uma iniciativa de vital importância para redução de custos e também para a economia de energia (THOLLANDER *et al.*, 2005). Processos de fundição corretamente selecionados apresentam maior confiabilidade e, como consequência, menores índices de refugo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal da tese é desenvolver um método multicriterial de seleção de processos de fundição de metais (MMSPF) para fabricação de componentes, considerando-se critérios técnicos (incluindo aspectos ambientais) e econômicos para ser aplicado nas fases iniciais do desenvolvimento do componente.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da tese são: (i) implementar uma avaliação econômica dos processos de fundição de metais considerando o custo estimado de fabricação em relação ao desempenho técnico; (ii) desenvolver um aplicativo computacional para implementar o método proposto; (iii) analisar quais critérios de separação inicial desqualificam o maior número de processos de fundição de metais, empregados, para fabricar os componentes usados na aplicação do MMSPF; (iv) identificar os processos de fundição com maior compatibilidade técnica com os componentes utilizados na aplicação do MMSPF.

### 1.2.3 Justificativa dos Objetivos

A seleção de processos de fundição apresenta grande interesse em termos de pesquisa acadêmica, dos quais destacam-se os trabalhos de Sirilertworakul *et al.* (1993), Darwish e El-Tamimi (1996), Akarte *et al.* (1999), Er e Dias (2000), Karthik *et al.* (2003), Allison *et al.* (2006), Akarte e Ravi (2007) e Daws *et al.* (2008). Apesar do grande desenvolvimento apresentado pelo tema de seleção de processos de fundição de metais, existem lacunas a serem preenchidas:

(i) em relação às informações utilizadas nos métodos de seleção de processos de fundição de metais, não são mencionados procedimentos empregados no tratamento das informações a serem utilizadas nos métodos de seleção;

(ii) critérios técnicos e econômicos de seleção de processos de fundição de metais estão bem determinados, mas, nos trabalhos existentes na literatura, a utilização de aspectos ambientais como critérios para selecionar processos de fundição de metais, não são relatados. A *Environmental Protection Agency* (2008) relata a importância de se verificar a possibilidade



de substituir processos de fundição potencialmente poluidores por outros processos de menor impacto ambiental, a inclusão de critérios ambientais na seleção pode contribuir com esta iniciativa;

(iii) a utilização da estimação dos custos de fabricação, para desenvolver uma estratégia de seleção baseada em avaliação econômica não é utilizada, apesar de ser mencionada de forma qualitativa. De acordo com Creese *et al.* (1992), nos estágios iniciais do desenvolvimento, o custo incorrido fica em torno de 5-7%, enquanto que os custos comprometidos em função das decisões tomadas são da ordem de 75-85% do custo total. Deste modo, considerar o custo de fabricação na seleção do processo torna-se um fator chave para o sucesso do desenvolvimento do produto, mais que isso, relacionar aspectos técnicos com o custo contribui como diretriz para o desenvolvimento de soluções técnicas adequadas ao componente desde a fase inicial do desenvolvimento.

Em síntese, a realização desta pesquisa, com base nos objetivos propostos pode contribuir para: (i) auxiliar no processo de desenvolvimento de novos componentes produzidos por fundição de metais; (ii) identificar os processos de fundição de metais com melhor índice de desempenho técnico (incluindo aspectos ambientais) em relação ao custo de fabricação; (iii) permitir avaliação econômica, na fase inicial do desenvolvimento de novos componentes, propiciando oportunidades de redução dos custos de fabricação do componente; (iv) possibilitar maior agilidade e confiabilidade nas atividades relacionadas com a seleção de processos de fundição de metais, em função da utilização do aplicativo computacional desenvolvido.

## 1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### 1.3.1 Classificação da pesquisa

De acordo com Jung (2009), a pesquisa desenvolvida nesta tese pode ser classificada em relação à natureza, objetivo, abordagem e procedimentos da seguinte maneira:

A pesquisa é de natureza aplicada, pela possibilidade de utilização imediata dos conhecimentos gerados, no uso do método ao selecionar processos de fundição de metais, no âmbito do desenvolvimento de novos componentes.

Em relação aos objetivos, a pesquisa pode ser classificada como exploratória, pois tem a finalidade de apresentar um novo método de seleção de processos de fundição de metais.

O presente trabalho faz uso de uma abordagem quantitativa, na qual as informações utilizadas e resultados obtidos encontram-se descritos em forma numérica.

Em termos de procedimentos, o trabalho foi desenvolvido por meio da pesquisa operacional, na qual um modelo analítico do problema, com representação matemática é proposto.

### 1.3.2 Etapas da Pesquisa

Esta pesquisa é desenvolvida em cinco etapas. A Figura 1 apresenta as etapas da pesquisa com as respectivas atividades desenvolvidas.

A primeira etapa do trabalho compreende uma revisão de literatura a respeito de métodos de seleção de processos de fabricação e métodos de seleção de processos de fundição de metais. Também se inclui nesta etapa, pesquisa bibliográfica sobre as ferramentas utilizadas no desenvolvimento do método de seleção proposto, como decisão multicritério discreta, método hierárquico analítico de decisão multicritério ou *Analytic Hierarchy Process* - AHP (Saaty 1977), operadores de agregação e modelos analíticos de apuração de custos de fabricação de componentes fundidos. As atividades desta etapa compreendem a pesquisa em base de dados, *handbooks* e sítios eletrônicos de fundições, a leitura e análise das informações e a produção de texto.

A segunda etapa refere-se à elaboração do método multicriterial de seleção de processos de fundição de metais. Problemas relacionados com seleção de alternativas e que envolvem o uso de múltiplos critérios, tais como o objetivo desta tese, podem ser adequadamente tratados por meio de decisão multicritério discreta. Segundo Kahraman (2008), nestes métodos a tomada de decisão se concentra em como selecionar ou classificar as diferentes alternativas, considerando apenas um número predeterminado de alternativas sob avaliação. Esta etapa contempla a determinação dos critérios e dos processos de fundição de metais a serem considerados como conjunto solução do processo de decisão. A revisão de literatura apresenta-se como a principal ferramenta para obtenção de subsídios para o desenvolvimento desta atividade. Na sequência realiza-se o modelamento matemático das etapas operacionais que compõem o método de decisão multicritério, e a atividade final consiste na avaliação dos resultados fornecidos pela modelagem com ajustes quando necessários.

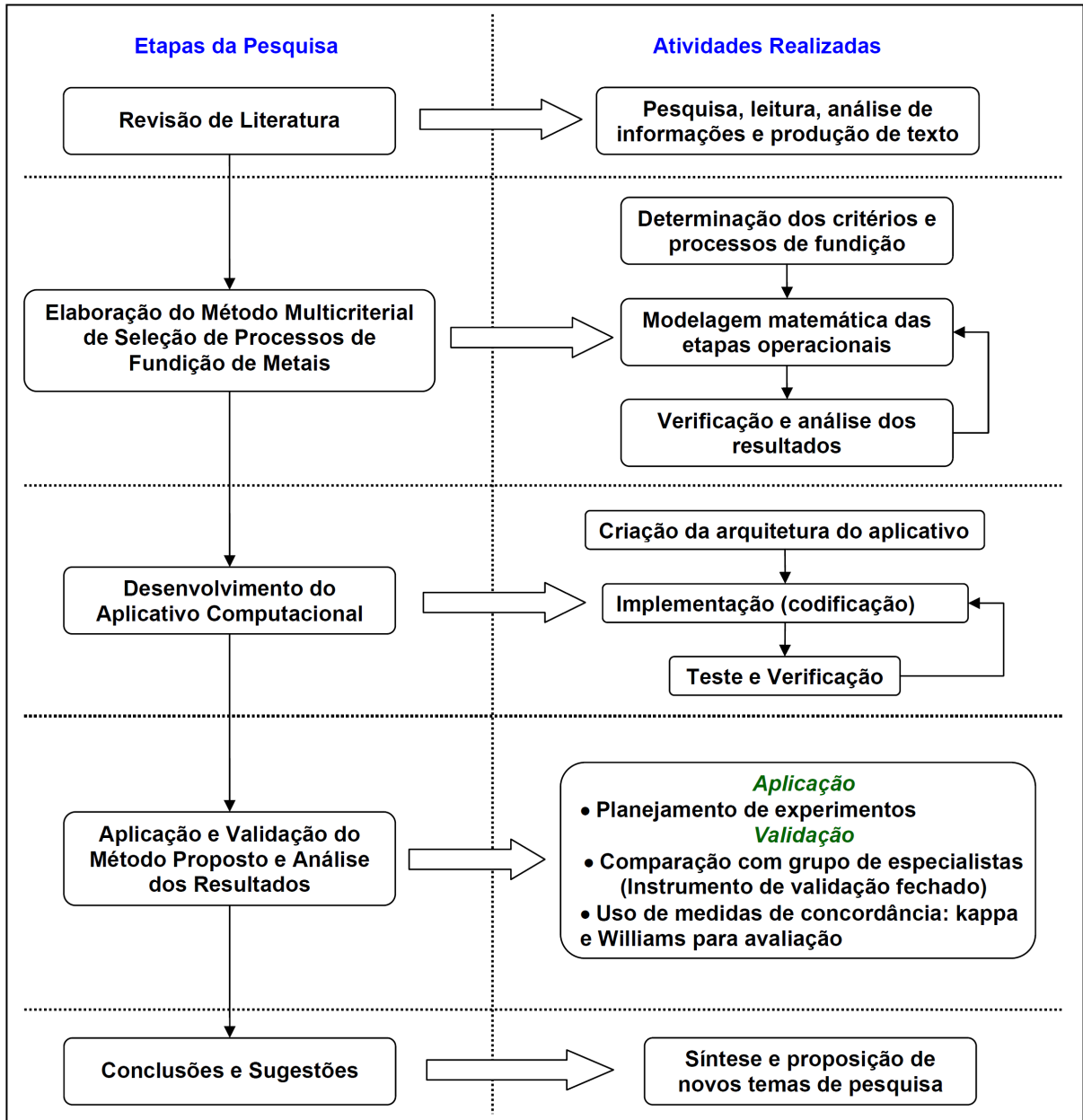


Figura 1 – Etapas da pesquisa com as respectivas atividades realizadas

FONTE: Autor.

A terceira etapa compreende o desenvolvimento de um aplicativo computacional, o qual tem a finalidade de facilitar a implementação do método proposto. As atividades desta etapa consistem na criação da arquitetura do aplicativo, forma como os componentes do sistema estão estruturados; a codificação que consiste na transcrição da modelagem matemática das etapas operacionais em uma linguagem de programação e o teste das funções do aplicativo, realizado por meio de comparações com resultados conhecidos e verificação de comportamento em caso de erro de utilização, como por exemplo, erros propositais de preenchimento.

A quarta etapa envolve a aplicação e validação do método multicriterial de seleção de processos de fundição de metais. Na aplicação utilizou-se o planejamento de experimentos para se determinarem os casos escolhidos para aplicação do método de seleção. Os componentes para seleção do processo de fundição, foram escolhidos com base em três fatores: complexidade de forma, tipo de liga, e tamanho do lote a ser produzido. Para realizar a validação do método proposto, buscou-se um grupo de especialistas para avaliar os mesmos casos (componentes) utilizados na aplicação. Foi criado um instrumento para obter a opinião dos especialistas em relação aos casos. Foram utilizados índices de concordância, como kappa (Cohen, 1960) e Williams (Williams, 1976) para analisar o desempenho do método proposto em relação ao grupo de especialistas.

A quinta etapa abrange as conclusões do trabalho e sugestões para a realização de trabalhos futuros.

#### 1.4 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO

O método de seleção de processos de fabricação proposto nesta tese é delimitado aos processos de fundição de metais, especificamente aqueles destinados à produção de componentes produzidos com forma próxima da final (*near net shape*) ou com forma final (*net shape*).

O método de seleção de processos de fabricação proposto nesta tese contempla as seis classes de ligas metálicas mais utilizadas na produção de componentes fundidos: aços, ferros fundidos, ligas de alumínio, ligas de cobre, ligas de magnésio e ligas de zinco, apropriadas aos processos de fundição de metais destinados à produção de peças. A seleção do material mais adequado para produzir o componente não é escopo do método proposto.

#### 1.5 ESTRUTURA DA TESE

O capítulo 1 apresenta o tema do trabalho e sua relevância; estabelece os objetivos do estudo; descreve os procedimentos metodológicos da pesquisa, e apresenta as delimitações e a estrutura da tese.

No capítulo 2, é apresentado o referencial teórico utilizado para desenvolver esta tese. São analisadas características técnicas dos principais processos de fundição de metais, sua classificação, aplicação e aspectos econômicos do setor de fundição. Também foram estudados os principais trabalhos relativos aos métodos de seleção de processos de fabricação,

métodos de seleção de processos de fundição de metais e ferramentas utilizadas no desenvolvimento do método proposto.

No capítulo 3, são descritas as etapas operacionais que compõem o método multicriterial de seleção de processos de fundição de metais.

O capítulo 4 trata do desenvolvimento de um aplicativo computacional para facilitar a aplicação do método multicriterial de seleção de processos de fundição de metais.

No capítulo 5, apresenta-se a aplicação e validação do método de seleção de processos de fundição de metais desenvolvido.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho, assim como sugestões para novas pesquisas. As referências são apresentadas ao final da tese.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, apresenta-se a primeira etapa do trabalho desenvolvido nesta tese, a revisão de literatura. São apresentados a definição, classificação e aspectos técnicos dos processos de fundição de metais, aplicações de componentes fundidos e sua importância econômica. Também são abordados os principais trabalhos relativos à seleção de processos de fabricação e os métodos de seleção de processos de fundição de metais. Ao final do capítulo, são descritas as ferramentas utilizadas para desenvolver o método de seleção proposto.

### 2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

#### 2.1.1 Definição e Classificação

Um processo de fabricação pode ser definido como uma operação na qual as características de um ou mais materiais são alteradas de alguma forma, a fim de produzir ou modificar-se um componente (LOVATT e SHERCLIFF, 1998a). Na definição de Ashby *et al.* (2007) os processos de fabricação são considerados como métodos de moldar, unir e dar acabamento a um material. Os métodos de moldar podem ser primários, os que dão forma, ou secundários, os quais modificam formas ou propriedades. Com base nestas definições, existe um grande número de processos de fabricação em todos os níveis de complexidade e escala. Para organizar as informações sobre processos, Ashby *et al.* (2007) apresentam uma classificação hierárquica, dando, a cada processo, um lugar. A Figura 2 apresenta um exemplo desta taxonomia.

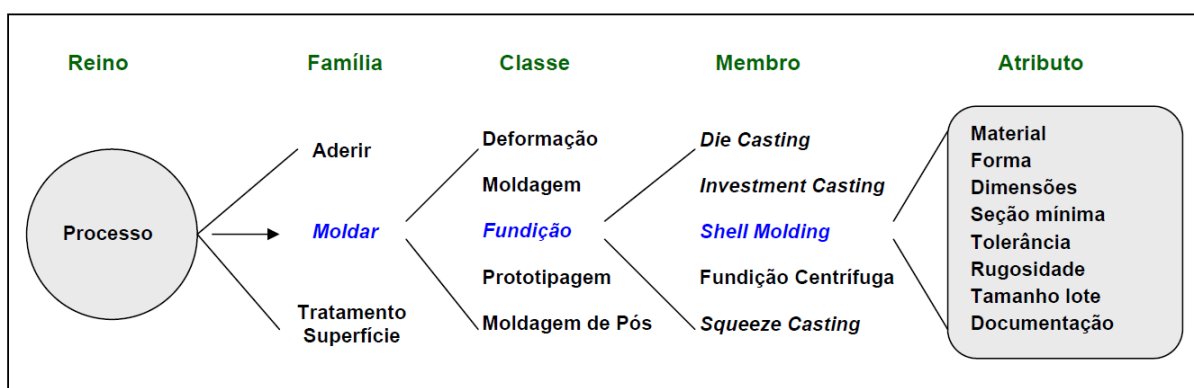


Figura 2 - A taxonomia dos processos de fabricação

FONTE: Ashby *et al.*, (2007).

Segundo esses autores, o universo dos processos de fabricação apresenta três famílias: moldar, unir e tratar superficialmente. Na Figura 1, a família moldar é expandida para mostrar classes: deformação, moldagem, fundição, prototipagem e moldagem de pós. Uma destas classes, a fundição é mais uma vez expandida para mostrar os seus membros: *die casting*, *investment casting*, *shell molding*, fundição centrífuga e *squeeze casting*. Cada processo é caracterizado por um conjunto de atributos: os materiais que podem ser utilizados, as formas que podem ser produzidas, as dimensões, a precisão dimensional e uma dimensão econômica, o tamanho do lote, que é o número de unidades que podem ser economicamente produzidas. Este conjunto de atributos é utilizado na seleção de processo de fabricação pela correspondência destes com os requisitos do projeto (ASHBY *et al.*, 2004).

### 2.1.2 Processo de Fundição de Metais

A fundição de metais consiste no vazamento de metal líquido para um molde com a forma do componente a ser fabricado e, após a solidificação, remover o componente metálico do molde (GLOWNIA, 1993; KAY, 2004; GROVER, 2007; KALPAKJIAN e SCHMID, 2009). Segundo Garcia (2001) a fundição de peças de materiais metálicos pode quase ser considerada como uma tecnologia pré-histórica. Segundo Kay (2004), não existem registros de quando e onde se utilizou a técnica pela primeira vez. Artefatos e referências bíblicas indicam que isto pode ter ocorrido na antiga Mesopotâmia entre 5000 a 6000 anos atrás.

Segundo Beeley (2001) em função da simplicidade, o mais direto de todos os processos metalúrgicos, a fundição de metais proporcionou a base para o crescimento de um amplo segmento industrial, com uma grande diversidade de produtos.

Em termos de concepção, componentes fundidos oferecem a maior flexibilidade entre os processos de conformação metalúrgica. A forma e o tamanho são requisitos fundamentais em termos de projeto de componentes. Nesse aspecto, as possibilidades oferecidas pelos processos de fundição de metais são insuperáveis (KANICKI, 1988). De acordo com o *Department of Energy* (2004), componentes fundidos são encontrados em 90% dos produtos manufaturados e equipamentos. Aplicações que vão desde simples utensílios domésticos às mais complexas peças de automóveis e aviões.

Além de aspectos relativos à forma dos componentes, processos de fundição podem ser aplicados a qualquer metal que possa ser fundido (GROOVER 2007). Existem ligas que, devido a aspectos metalúrgicos, só podem ser produzidas pela técnica de fundição, como é o caso dos ferros fundidos, os quais são ligas ternárias de ferro, silício e carbono, o qual

encontra-se livre na forma de grafita e combinado na forma de intermetálico  $Fe_3C$  (RUNDMAN, 1999).

Segundo Beeley (2001), em relação aos aspectos produtivos, a fundição de metais apresenta vantagens em termos de custo de ferramental e de flexibilidade de processo, considerando-se os demais processos primários de fabricação de metais.

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

Quanto à flexibilidade do processo, componentes fundidos podem ser fabricados com investimento relativamente pequeno, como em fundições de pequeno porte, com operações manuais, de uma forma quase artesanal. Em função da facilidade de mecanização e automação das operações do processo de fundição, nas fundições de grande porte, pesados investimentos podem ser realizados para a produção de altos volumes de componentes com baixo custo unitário (BEELEY, 2001). De acordo com Kalpakjian e Schmid (2009), a mecanização e automatização dos processos de fundição é uma das tendências de maior impacto sobre a indústria de fundição, que tem levado a significantes mudanças no uso de equipamentos e mão de obra, empregados na produção de componentes fundidos.

A Figura 2 apresenta as principais etapas que compõem o processo produtivo de fundição de metais. Na parte superior da figura, são descritas as fases envolvidas com o desenvolvimento de novos componentes fundidos e, na parte inferior, as etapas normalmente executadas na produção de componentes fundidos.

O desenvolvimento inicia-se com a seleção do processo de fundição de metal, pois, conforme o processo selecionado, serão necessárias diferentes providências no estágio de projeto e especificação.

Na etapa de projeto é que se determinam as características do ferramental que irá produzir o componente fundido, tais como: dimensões e número de modelos na ferramenta, localização da linha de partição, marcação de machos, acréscimo de contração, sobremetal para usinagem, material e o sistema de alimentação. Nesta fase, é onde normalmente se utilizam os recursos de simulação de enchimento do molde e de solidificação do componente, de acordo com Guesser *et al.* (2003), com o uso da simulação, é possível detectar falhas no projeto já nos seus instantes iniciais. No que tange à especificação, pode-se considerar recomendações relacionadas à liga. Como por exemplo, especificar a norma técnica para



produzir a liga, ou a norma técnica adotada na inspeção dimensional ou de qualidade do componente fundido.

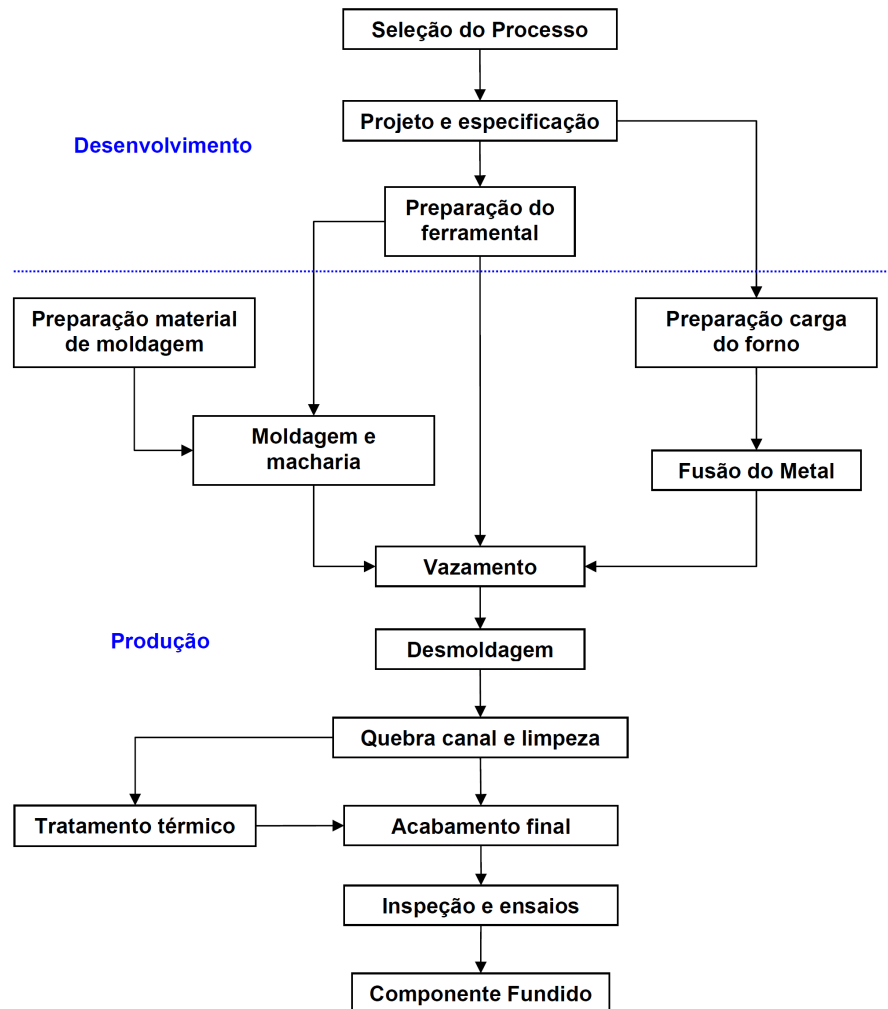


Figura 3 – Principais etapas do desenvolvimento e da produção de componentes obtidos por processos de fundição de metais

FONTE: Adaptado de Beleey (2001).

Na etapa de confecção do ferramental, todas as especificações do projeto devem ser executadas e verificadas adequadamente. Com a finalização da preparação do ferramental, inicia-se as fases do processo produtivo. Nos processos em que se utilizam moldes dispensáveis, é necessário produzir os moldes, com material apropriado ao metal a ser fundido. Nos processos de molde permanente, a etapa de preparação do molde não é necessária, e o próximo estágio destes processos consiste no vazamento do metal fundido no molde (BEELEY, 2001).

O metal utilizado na etapa de vazamento é proveniente do setor de fusão. As duas etapas associadas à obtenção de metal líquido são a preparação da carga metálica e a fusão. A

preparação da carga do forno ocorre a partir de matérias primas como sucatas diversas, lingotes, retornos do próprio processo como canais e massalotes e elementos de correção, os quais são convertidos em metal líquido com a composição química adequada. Existem diversos tipos de fornos utilizados na fusão de metais, diferenciam-se em função da fonte de energia em fornos elétricos e a combustível de diferentes origens na forma de gás ou óleo (BOLJANOVIC, 2009).

Após solidificação do fundido no molde, na etapa desmoldagem, o componente é separado do molde em que foi produzido.

Na etapa de quebra de canal, ocorre a remoção do sistema de alimentação, constituído por canais e massalotes; estes elementos levam o metal líquido até o componente, após sua separação são encaminhados ao setor de fusão para serem reciclados e servir de matéria-prima. A limpeza tem a finalidade de remover resíduos do material do molde, como areia por exemplo, e pequenas rebarbas (BEELEY, 2001).

No acabamento final, o esmerilhamento é utilizado para remover as rebarbas e outras protuberâncias em excesso na peça fundida. Caso seja necessário realizar algum tratamento térmico no componente fundido, este normalmente é realizado antes do acabamento final.

Apesar do controle ser realizado durante as etapas de processamento, a inspeção do componente fundido pode ser efetivada apenas ao final de todas as etapas do processo produtivo. Em função desta característica, evidencia-se a importância de se priorizar controle das etapas do processo produtivo, e também no aperfeiçoamento das fases de desenvolvimento, para que se possa obter componentes que atendam às especificações com custo competitivo (BEELEY, 2001).

### 2.1.3 Classificação dos Processos de Fundição de Metais

Segundo Groover (2007), os processos de fundição podem ser divididos em fundição de lingotes e de peças. De acordo com este autor, a fundição de lingotes é destinada à produção de formas simples, para o processamento primário de metais, os quais são submetidos a processos subsequentes de conformação, como laminação ou forjamento. Enquanto a fundição de peças envolve a produção de geometrias mais complexas, próximas da forma final desejada para o componente.

Existe um grande número de processos de fundição de peças. Os vários processos diferem, principalmente, no material em que os moldes são produzidos, no método de produção dos moldes e na forma com que a pressão é aplicada sobre o metal fundido durante

o vazamento, que pode ser por gravidade, força centrífuga, vácuo, baixa pressão e alta pressão (RAVI, 2005). A Figura 4 apresenta os principais processos de fundição em relação às características discutidas.

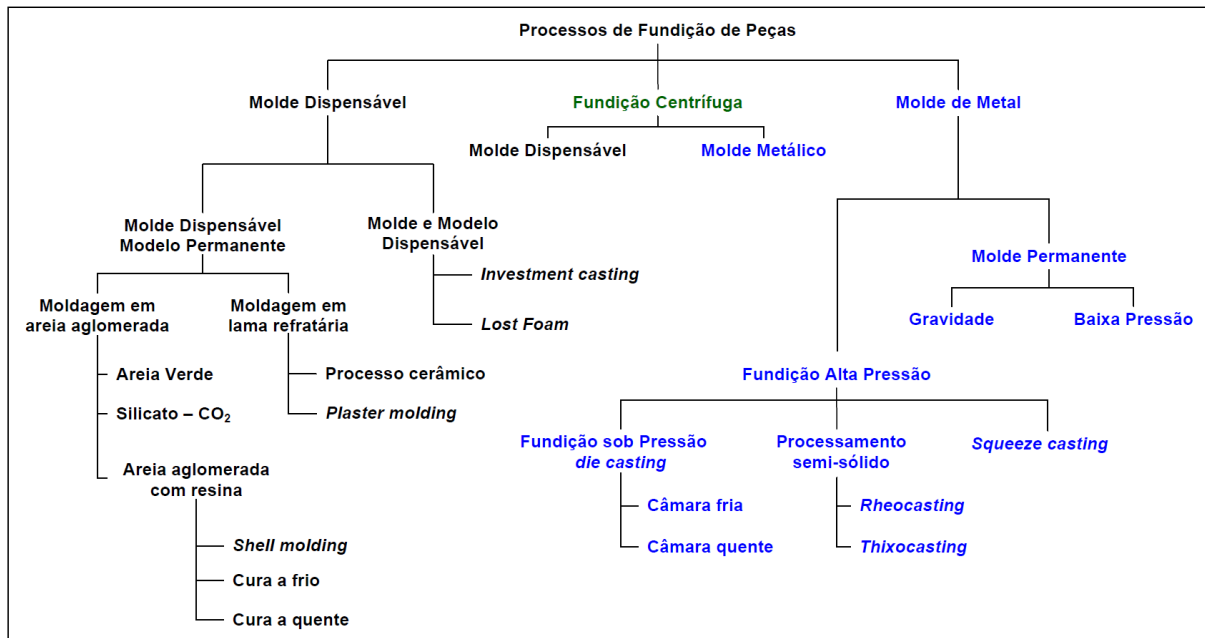


Figura 4 – Classificação dos processos de fundição de peças

FONTE: Adaptado de Jorstad (2008).

Com base no material utilizado na confecção do molde, os processos de fundição de metais, podem ser classificados em dois grupos; os de molde dispensável e os de molde permanente (JORSTAD, 1988).

Um molde dispensável é aquele em que, a cada componente produzido, é necessário à confecção de um novo molde. Os moldes dispensáveis são produzidos com material refratário ao metal a ser fundido, como areia de sílica, cromita, zirconita, gesso e suspensões líquidas refratárias. Nos processos que utilizam este tipo de molde é necessário um ferramental, denominado de modelo, permanente ou dispensável, sendo este último utilizado apenas uma vez. Os modelos permanentes são produzidos em madeira, polímeros ou metal, enquanto os modelos dispensáveis são confeccionados em cera, poliestireno expandido (EPS) ou outros materiais poliméricos (RAVI, 2005). Nos processos de molde dispensável todos os tipos de metais e ligas podem ser fundidos.

Os principais processos de molde dispensável usam areia na confecção do molde e modelo permanente, tais como a moldagem em areia verde, *shell molding*, areia silicato - CO<sub>2</sub> e areia com resina de cura a frio. Os processos denominados de *investment casting* são

aqueles que utilizam suspensões líquidas refratárias (lamas refratárias) como material do molde. Podem utilizar modelos permanentes, como o processo cerâmico ou o processo *Shaw*, ou modelos perdidos, como o processo de fundição por cera perdida (*lost wax*), com modelos de cera. Este é o processo mais usado desta categoria, pois permite a produção de pequenos componentes, com grande precisão dimensional e excelente acabamento superficial (Perry, 2008).

Um molde permanente é aquele que pode ser utilizado muitas vezes, não necessitando de modelo. Normalmente é confeccionado em aço ou grafite, com a forma negativa do componente a ser produzido. Todos os metais podem ser fundidos por processos que utilizam molde permanente, porém os não ferrosos são os normalmente processados em virtude de seu menor ponto de fusão (BOLJANOVIC, 2009).

Os processos convencionais que usam molde permanente, tais como: fundição em molde permanente (gravidade), fundição em molde permanente (*low pressure*), fundição sob pressão de câmara quente e fria (*die casting*) são muito utilizados na fabricação de bens de consumo no atual mercado mundial (VINARCIK 2003). Segundo Jorstad (2008), processos que recorrem molde permanente são apropriados para a produção em série de componentes fundidos em ligas leves para aplicação automotiva.

O processo *Squeeze Casting* utiliza molde permanente e alta pressão como nos processos de fundição sob pressão convencionais. As principais diferenças encontram-se nos estágios intermediários de processamento, neste processo, o metal é vazado no molde aberto, e só depois de fechado é que se aplica a alta pressão (VINARCIK 2003). Este processo é destinado principalmente à produção de componentes fundidos de alta integridade (baixa porosidade) e alto desempenho em relação a propriedades mecânicas.

#### 2.1.4 Processos de Fundição que Utilizam Areia na Confeção do Molde

Os processos de fundição que fazem uso da areia na confecção do molde encontram-se entre os mais versáteis processos de conformação metalúrgica, provendo uma enorme liberdade de projeto em termos de tamanho, forma e qualidade dos componentes produzidos (PIWONKA, 1988). Segundo Jorstad (2008), estes processos podem ser classificados de acordo com a forma com que os grãos de areia são aglomerados, classificam-se em:

(i) *processos de areia aglomerada*; neste grupo encontram-se os processos em que os grãos de areia são aglomerados com ligantes inorgânicos, tais como o processo de areia verde, que utiliza argila (bentonita) e água como ligante e o processo areia silicato CO<sub>2</sub> com silicato de

sódio como ligante e CO<sub>2</sub> como agente de cura;

(ii) *processos aglomerados com resina*; a aglomeração da areia é promovida por resinas orgânicas que polimerizam entorno dos grãos de areia. Incluem sistemas do tipo *no-bake*, cujos sistemas curam pela mistura de duas resinas com a adição de um catalisador como o sistema fenólico uretânico, resinas curadas pelo calor como o processo *shell molding* e resinas curadas a frio com auxílio de um gás (*cold box*).

O processo de fundição em areia mais utilizado é a moldagem em areia verde, que utiliza na confecção dos moldes, areia de sílica, argila (bentonita) e água. Este processo é um dos mais usados na produção de componentes fundidos (ASTHANA *et al.*, 2006). O seu maior emprego se deve à simplicidade, economia das operações envolvidas e por ser aplicado tanto à moldagem de peças isoladas como à produção de grandes séries (GLOWNIA, 1993). As principais etapas deste processo consistem na mistura da areia com a bentonita, água e pó de carvão, por meio de misturadores adequados. A areia preparada é encaminhada para a moldagem, quando é compactada em torno de um modelo, dentro de uma caixa. Após a compactação o modelo é retirado obtendo-se um molde em areia, pronto para receber o metal fundido. A compactação pode ser manual, mecanizada e de alta pressão. A compactação manual utiliza martelos pneumáticos; a compactação mecanizada, máquinas do tipo *jolt-squeeze* e as máquinas de alta pressão utilizam sopro de ar e compactação hidráulica para produzir o molde. Um tipo de máquina de alta pressão muito usada que não recorre a caixas de moldar, mas apenas bolos de areia é a *Disamatic* em que a linha de partição é vertical e a cavidade do molde é formada entre os blocos consecutivos dos bolos de areia (RAVI 2005). A última geração de máquinas *Disamatic* permite a produção de altos volumes, como 450 moldes em areia verde por hora, com grande precisão dimensional (DISA INDUSTRIES, 2007).

Em função de sua maior utilização, o processo de moldagem em areia verde é o responsável pelo maior volume de resíduos gerados no setor de fundição. Segundo Zanetti e Fiori (2002), de 30 a 60% dos resíduos produzidos pelas fundições são compostos de areias de moldagem e restos de machos. A recuperação e a reutilização destes resíduos é a alternativa de menor impacto ambiental e também contribui na redução dos custos de produção. Segundo a *Environmental Protection Agency* (2008) cerca de 2,6 milhões de toneladas de areia são reutilizadas por ano nos Estados Unidos, o que representa apenas 28% do total de areia de fundição disponível para reuso. Além da reutilização na própria fundição, as areias de fundição recicladas podem ser aproveitadas em outros processos industriais (FIORE e ZANETTI, 2007).

No processo areia silicato-CO<sub>2</sub>, o molde utiliza um sistema ligante à base de silicato de sódio. Este é adicionado à areia na proporção de 3% a 4% em peso, em um misturador. A mistura preparada é compactada em torno do modelo e submetida a um tratamento com CO<sub>2</sub>, de modo que o fluxo de gás atravesse o molde. Devido à reação do CO<sub>2</sub> com o silicato de sódio, forma-se sílica gel, carbonato de sódio e água, resultando no endurecimento do molde em um curto período de tempo (ASTHANA *et al.*, 2006). Este processo pode ser utilizado na confecção de moldes e machos. Neste processo a confecção dos moldes é geralmente realizada de forma manual, ou com pouca mecanização, principalmente no transporte da areia e na gasagem dos moldes. A principal vantagem deste método reside no fato de empregarem-se materiais não tóxicos; silicato de sódio e CO<sub>2</sub>; e a operação à temperatura ambiente, não tendo a necessidade de aquecimento para realizar o endurecimento do molde. O principal problema apresentado por este processo é a dificuldade na desmoldagem das peças. Isto ocorre devido à sinterização da sílica gel durante o contato com o metal líquido, o que provoca aumento na resistência do molde dificultando sua quebra (ASTHANA *et al.*, 2006). Apesar deste processo não gerar resíduos perigosos por utilizar ligantes inorgânicos, o volume dos resíduos gerados torna-se um problema em função do custo do descarte da areia. Por este motivo, técnicas de tratamento dos resíduos de areia silicato - CO<sub>2</sub> que possibilitem sua reutilização no processo, têm sido propostas (DEZENA *et al.*, 2004; SCHEUNEMANN, 2005). A técnica de lavagem, que utiliza água para retirar o sódio dos resíduos, tem apresentado bons resultados em escala industrial, permitindo um reaproveitamento da ordem de 98% com um custo competitivo (DEZENA *et al.*, 2004).

No processo *shell molding*, também conhecido como processo *Croning* ou moldagem em casca, a areia é coberta com uma mistura de duas resinas que polimerizam pela ação do calor. A obtenção dos moldes neste processo consiste em derramar a areia coberta sobre um modelo metálico aquecido entre 205 e 315 °C durante 10 a 30 segundos. A resina endurece por calor, resultando numa casca forte e rígida de 5 a 10 mm de espessura, que é posteriormente destacada do modelo. São normalmente utilizadas duas cascas, fixadas juntas para formar o molde do processo areia *shell molding* (ARCHIBALD e SMITH, 1988). Este processo de moldagem permite a automação e a produção de peças fundidas com acabamento superficial muito bom e com boa definição de detalhes. Este processo é muito utilizado na confecção de machos para a moldagem em areia verde (RUNDMAN, 1999).

A principal desvantagem do processo *shell molding* encontra-se na grande emissão de poluentes gasosos durante o vazamento do metal e a toxidez dos resíduos, pois a resina deste processo contém elementos tóxicos na sua formulação, como fenol e amina. Segundo Kerns e

Mizwicki (2007), recentes inovações na formulação das resinas têm sido desenvolvidas para contornar os problemas do processo *shell molding* e ainda melhorar o seu desempenho. Ao alterar a composição química dos reagentes utilizados na cura da areia, foi possível obter uma melhora na produtividade, e uma redução significativa na emissão de poluentes atmosféricos desse processo.

No processo areia cura frio (*no bake*) que utiliza resina fenólica uretânica, o sistema ligante é composto por três partes. A parte I é uma resina fenol-formaldeído dissolvida em uma mistura de solventes, a parte II é um polisocianato dissolvido em solventes e a parte III é um catalisador a base de amina que regula a reação química entre a parte I e a parte II. O teor de parte I e II utilizada na areia é de 0,7 a 2% e de catalisador de 0,4 a 8% dependendo da velocidade de cura exigida (ARCHIBALD & SMITH, 1988). A confecção dos moldes neste processo é similar ao processo de fundição em areia verde, porém sem a necessidade de compactação da areia. Este processo de moldagem permite a obtenção de moldes de alta resistência mecânica. Este processo é muito utilizado na confecção de machos de grande porte.

Os restos de moldes e machos do processo areia cura frio contém fenol proveniente da resina, gerando problemas com o descarte deste resíduo. As principais técnicas utilizadas na reciclagem da areia deste processo utilizam processos mecânicos, térmicos e de oxidação química (SCHEUNEMANN, 2005).

### 2.1.5 Aplicações e Produção de Componentes Fundidos

As aplicações para componentes fundidos são bastante amplas. Em função de sua versatilidade, o processo de fundição possibilita a confecção de componentes que possuem desde alguns gramas como um suporte de relógio a várias toneladas como em um bloco de motor de navio. A complexidade de forma, desde simples como a tampa de um bueiro até as mais intrincadas como um bloco de motor de 8 cilindros. O tamanho do lote, desde uma peça como a mandíbula de um britador até produção em série como de discos de freio para automóveis. A precisão dimensional desejada e o acabamento superficial podem ser alcançados pela correta seleção do processo e seu controle. Outra importante vantagem é que diferentes peças podem ser combinadas em um único componente, eliminando-se a montagem, estoques e reduzindo-se os custos em 50% ou mais, em comparação com peças usinadas. Em termos ambientais, componentes fundidos podem ser completamente reciclados. Estima-se que cerca de 15 milhões de toneladas de peças fundidas são recicladas a cada ano

(RAVI 2005). As principais áreas de aplicações de componentes fundidos, no Brasil, são apresentadas na figura 5.

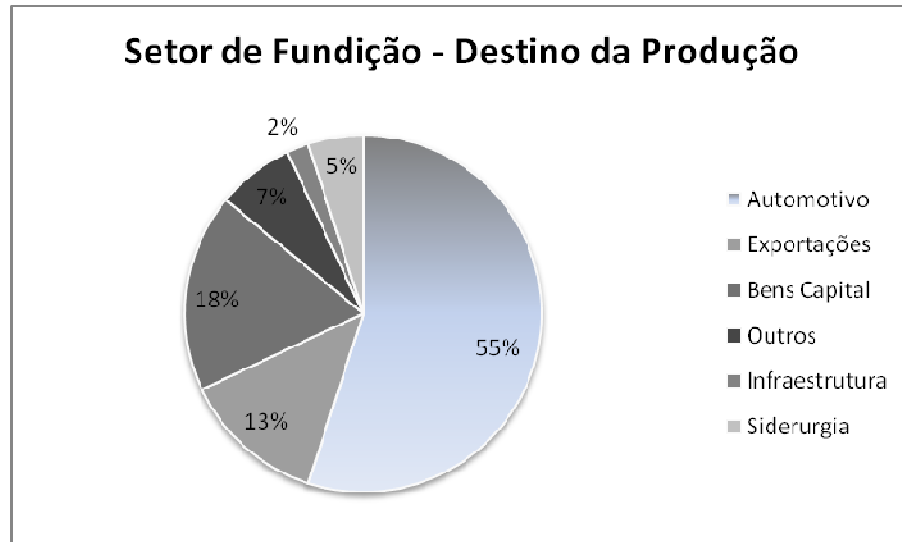


Figura 5 - Destino da produção do setor de fundição brasileiro em 2008

FONTE: ABIFA 2009.

O setor automotivo é destino da produção de 55% das peças produzidas pelo setor de fundição; isto se deve a grande quantidade de componentes fundidos presentes em um automóvel. A exportação é o segundo mercado para produção brasileira de fundido, devido, principalmente, à disponibilidade de matérias primas, energia a baixo custo e à competitividade das empresas de fundição brasileiras (ABIFA 2009).

As ligas mais produzidas incluem os metais ferrosos como o ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular e aço. As ligas de ferro e aço são utilizadas para aplicações de alto desempenho, como resistência à temperatura, desgaste e resistência à corrosão. As ligas não ferrosas mais utilizadas são as de alumínio, cobre, magnésio e zinco. A produção e aplicação de componentes de ferro fundido nodular e alumínio estão crescendo progressivamente. O alumínio ultrapassou o aço em termos de produção em massa. O consumo de ligas de magnésio está aumentando rapidamente nos automóveis e em outros setores, devido a sua alta relação resistência peso (RAVI 2005). A Tabela 1 apresenta os principais metais fundidos no mundo com suas respectivas características e aplicações típicas.



Tabela 1 - Principais metais fundidos, com suas características e aplicações

<b>Metal</b>	<b>Uso</b>	<b>Características</b>	<b>Aplicações</b>
Ferro Fundido Cinzento	46%	Resistência ao calor Amortecimento de vibração Baixo custo	Blocos de motor Discos de freio Base de máquinas Cárteres
Ferro Fundido Nodular	25%	Resistência mecânica Resistência ao desgaste Resistência ao impacto Estabilidade dimensional Usinabilidade	Girabrequins Comando de válvulas Caixas de diferencial Válvulas
Alumínio	12%	Relação resistência peso Resistência a corrosão	Pistões de carros Rodas de carros Caixas de embreagem
Aço	11%	Resistência mecânica Usinabilidade Soldabilidade	Partes de máquinas Rodas dentadas Válvulas
Cobre	2%	Alta ductilidade Resistência a corrosão	Hélice de barcos Rotores de bombas Válvulas
Outras ligas	4%	Diversas	Diversas

FONTE: Ravi (2005) e *Modern Casting* (2009).

De acordo com o censo mundial de produção do setor de fundição, realizado pela revista americana *Modern Casting* (2009), foram produzidas no mundo em 2008 cerca de 93,5 milhões de toneladas de componentes fundidos, uma redução de 1,5% em relação ao ano anterior, em função da recessão global iniciada no último trimestre de 2008. A Tabela 2 apresenta os dados relativos à produção total, por tipo de liga e com a produtividade de cada país.

Tabela 2 – Maiores produtores mundiais de fundidos com a produtividade de cada país

<b>País</b>	<b>Produção (milhões de toneladas)</b>				<b>Produtividade (mil toneladas por fundição)</b>
	<b>Ferro Fundido</b>	<b>Aços</b>	<b>Não Ferrosos</b>	<b>Total</b>	
China	24,60	4,60	3,80	33,50	1,202
Estados Unidos	7,10	1,20	2,50	10,80	4,970
Rússia	5,10	1,30	1,20	7,80	4,727
Índia	5,30	0,90	0,55	6,80	1,455
Alemanha	4,50	0,22	0,90	5,8	9,640
Japão	4,80	0,30	0,56	5,70	4,089

Continua

Tabela 2 - conclusão

País	Produção (milhões de toneladas)			Total	Produtividade (mil toneladas por fundição)
	Ferro Fundido	Aços	Não Ferrosos		
Brasil	2,30	0,32	0,25	3,4	2,504
Itália	1,60	0,10	1,00	2,60	2,260
França	1,96	0,11	0,33	2,40	4,985
Coreia do Sul	1,60	0,15	0,27	2,10	2,366

FONTE: *Modern Casting* (2009).

Juntos, os dez maiores produtores correspondem a 86,5% da produção mundial. Mesmo com queda na produção mundial, destaque para China, Brasil, Coreia do Sul e Polônia que, de 2007 para 2008, apresentaram crescimentos de 7%, 4%, 2,2% e 1,6% respectivamente. Dentre os dez maiores produtores, as maiores quedas na produção foram relatadas pelo Japão com uma redução de 18,8% e Estados Unidos com redução de 8,8% em relação a 2007. Em relação à produtividade, a Alemanha mantém o primeiro lugar com uma média de 9,640 mil toneladas por fundição (MODERN CASTING, 2009).

### 2.1.6 Fundições

No Brasil existem cerca de 1340 fundições com base nos dados de 2008 (MODERN CASTING, 2009). Estas fundições podem ser classificadas quanto ao tipo de material processado, ao volume de produção e ao tipo de clientes aos quais sua produção se destina (PIWONKA, 1988; RAVI, 2005).

Quanto ao tipo de material, as fundições podem ser de metais ferrosos, como ferro fundido e aço, e não ferrosos, como ligas de alumínio, cobre, magnésio e zinco. No Brasil, existem cerca de 743 fundições de metais ferrosos e 597 fundições de materiais não ferrosos (MODERN CASTING, 2009).

Em relação à capacidade de produção, as fundições podem ser classificadas como, pequenas, médias e grandes. A capacidade pode se referir tanto à capacidade de fusão, a qual depende dos fornos instalados e em funcionamento, ou a produção efetiva de peças boas produzidas (RAVI, 2005). No Brasil, a classificação se refere à capacidade de produção de peças boas. Considera-se uma fundição de pequeno porte aquela que produz até 500 toneladas de peças por ano, uma fundição de médio porte de 500 a 10.000 toneladas por ano e as que produzem acima de 10.000 toneladas por ano são consideradas como fundições de grande

porte. Cerca de 95% das fundições brasileiras são de pequeno e médio porte (ABIFA, 2008). As grandes fundições de metais ferrosos, normalmente, são equipadas com sistemas de moldagem em areia verde, e com vazamento completamente automatizados. Entretanto, nas pequenas fundições, a maioria das operações é realizada manualmente.

Em relação aos clientes, a que se destina à produção, as fundições podem ser classificadas em cativas e de mercado. Uma fundição cativa é aquela que faz parte de uma grande empresa, que absorve totalmente a sua produção. Neste tipo de fundição, poucos itens são produzidos e em grande quantidade. Fundições de mercado são aquelas que produzem para diferentes clientes, normalmente com uma enorme quantidade de itens com bastante variação no tamanho dos lotes produzidos. A maior parte das fundições existentes é de mercado, sendo em sua grande maioria de pequeno e médio porte (SENTHIKUMARA *et al.*, 2009). Segundo Ravi (2005), a linha que define os dois tipos de fundições é cada vez mais tênue, pois existem fundições de mercado especializando-se na produção de poucos itens como girabrequins, por exemplo, enquanto existem fundições cativas que estão começando a atender a outras organizações que não a empresa matriz, com a finalidade de uma melhor utilização da sua capacidade e de manter uma maior vantagem competitiva. Segundo este autor, ambos os tipos de fundições estão se dirigindo no sentido do aumento dos níveis de automação.

De acordo com Ravi (2005), ao longo da última década, tem ocorrido um aumento constante das exigências dos compradores de fundidos, como montadoras e fabricantes de equipamentos, em termos de garantia de qualidade, menor *lead-time*, pequenos lotes de produção e preços competitivos. Montadoras estão eliminando inspeção dos componentes recebidos e transferindo, aos fornecedores, a responsabilidade pela qualidade dos fundidos. Devido à diminuição dos ciclos de desenvolvimento de produtos, as fundições são obrigadas a entregar a primeira amostra, em semanas, em vez de meses. A adoção da filosofia *Just-In-Time* pelas montadoras para reduzir os seus custos de estoque exige que as fundições entreguem pequenos lotes e com maior frequência, obedecendo a uma rigorosa programação de horários. Os compradores de fundidos querem que as fundições reduzam continuamente os seus custos a cada ano, adotando melhores tecnologias e metodologias (JENDRUCKO *et al.*, 2003; VIJAYARAM *et al.*, 2006). Fundições também têm de lidar com a crescente pressão dos órgãos reguladores, em termos de conservação de energia, proteção do meio ambiente e segurança operacional.

Segundo Ravi (2005), muitos clientes-chave, particularmente no setor automotivo, estão se encaminhando em direção a parcerias estratégicas de longo prazo com poucas

fundições capacitadas, em vez de acordos de compra, em termos de custos, com um grande número de fundições, como no passado. Isto significa que, para sobreviver e crescer, as fundições têm que oferecer componentes fundidos dimensionalmente estáveis e isentos de defeitos, garantir a entrega de pequenos lotes no prazo e proporcionar redução contínua dos preços. Isto está forçando a especialização das fundições, em termos de ligas, na geometria das peças (tamanho / peso e complexidade) e aplicação final. Os compradores de fundidos e fornecedores estão percebendo a importância de assegurar a compatibilidade entre o projeto do componente e o processo, pela integração do desenvolvimento do produto e do processo através de uma estreita colaboração a partir da fase inicial do projeto do componente.

## 2.2 SELEÇÃO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

A seleção de processos de fabricação apresenta-se como uma área de estudo de grande importância. Ela apresenta interfaces com outras áreas como a concepção de forma, a seleção de materiais, as fases do desenvolvimento de produtos e com as metodologias de desenvolvimento de produto. Esta associação com outras áreas proporciona o desenvolvimento de um grande número de trabalhos sobre seleção de processos de fabricação, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais trabalhos sobre seleção de processos de fabricação

<b>Trabalho de Seleção de Processos</b>	<b>Seleção Material</b>	<b>Fases Desenvolvimento</b>	<b>Forma</b>	<b>Metodologia Desenvolvimento</b>
Lovatt e Shercliff (1998a)	X	1º		
Lovatt e Shercliff (1998b)	X	1º		
Ashby <i>et al.</i> (2004)	X	1º		
Yu <i>et al.</i> (1993)	X	1º	X	
Lenau (1996)	X	1º		DFM
Esawi e Ashby (1998a)	X	1º		
Esawi e Ashby (1998b)	X	1º		
Giachetti (1998)	X	1º		
Perzyk e Meftah (1998)		1º	X	
Chen <i>et al.</i> (2000)	X	1º	X	
Johnson <i>et al.</i> (2002)	X	1º		
Esawi e Ashby (2003)	X	1º		
Santos e Ferrante (2003)	X	1º		
Zha (2005)	X	1º		
Gupta <i>et al.</i> (2003)	X	2º	X	
Shercliff e Lovatt (2001)	X	2º		
Chan <i>et al.</i> 1998	X	1º e 3º		CAPP
Maropoulos <i>et al.</i> (1998)		1º e 3º	X	CAPP
Feng e Zhag (1999)		1º e 3º		CPP

Continua

Tabela 3 - conclusão

Trabalho de Seleção de Processos	Seleção Material	Fases Desenvolvimento	Forma	Metodologia Desenvolvimento
Gayretli e Abdalla (1999)		1° e 3°	X	CAPP
Feng e Song (2000)		1° e 3°		CPP
Long <i>et al.</i> (2002)		1° e 3°	X	CAPP
Swift e Booker (2003)	X	1° e 3°	X	DFM
Dantan <i>et al.</i> (2008)		1° e 3°		CPP - DFM
Ferrer <i>et al.</i> (2009)		1° e 3°		DFM
Jain e Jain (2003)		Produção	X	CAPP
Esawi e Ashby (2004)	X	Produção	X	
Parkan e Wu (1996)		Produção		
Ravisankar <i>et al.</i> (2006)		Produção		
Chakraborty e Dey (2007)		Produção	X	
Correia e Ferraresi (2007)		Produção		

FONTE: Autor.

LEGENDA	1° - Estágio pré-inicial e projeto conceitual	CAPP - Planejamento do processo auxiliado por computador
	2° - Projeto preliminar	CPP – Planejamento do processo conceitual
	3° - Projeto detalhado	DFM – Projeto para manufatura

### 2.2.1 Principais Elementos da Seleção Processos

Os trabalhos de Lovatt e Shercliff (1998a; 1998b) e Ashby *et al.* (2004) são apresentados inicialmente, pois fornecem uma introdução a respeito dos principais elementos da seleção de processos de fabricação.

O trabalho de Lovatt e Shercliff (1998a) apresenta o tema de seleção de processos de fabricação aplicado ao projeto de engenharia de componentes. Ou seja, aborda apenas características de engenharia sem envolver elementos não-funcionais no projeto. Os principais aspectos deste trabalho envolvem a relação entre material-forma-processo, a influência das fases e metodologias do desenvolvimento de produtos na seleção de processos: contempla, também, a classificação das técnicas empregadas na solução dos problemas de seleção de processos.

Segundo os autores acima citados, a seleção do processo de fabricação é influenciada pelo material e pela forma do componente. As interações ocorrem de dois modos: a especificação de forma que restringe a escolha do material e do processo, mas igualmente, a especificação do processo limita o material que pode ser usado, assim como a forma que pode ser obtida. Em relação à influência das fases do desenvolvimento na seleção de processos, Lovatt e Shercliff (1998a) argumentam que o nível de detalhamento necessário às decisões de seleção aumenta a medida que as fases evoluem do projeto conceitual ao projeto detalhado.

De acordo com os autores, um importante fator a ser considerado na seleção de processos são as metodologias de desenvolvimento de produto. Na metodologia de desenvolvimento de produto com projeto modular proposta por Pahl e Beitz (2007), o projeto é dividido em módulos funcionais com o mínimo de interação entre eles. Isto simplifica o projeto, mas dificulta a fabricação pelo elevado número de componentes e pelos custos de montagem. O Projeto para Manufatura (DFM) tem uma abordagem distinta do projeto modular: nesta metodologia, muitas funções são combinadas em um único componente de maneira a facilitar a fabricação. Muitas metodologias DFX têm sido incorporadas à seleção de processos, tais como projeto para montagem, projeto para desmontagem, projeto para reciclagem entre outras. Uma solução de compromisso é desenvolver inicialmente o projeto de forma modular e depois realizar a redução do número de componentes. Esta abordagem é facilitada pela disponibilidade de *softwares* de Engenharia Simultânea, os quais ajudam a gerenciar o projeto e assegurar a consistência entre os componentes.

As três principais técnicas utilizadas para direcionar os problemas de seleção de processos de acordo com Lovatt e Shercliff (1998a) são metodologias, procedimentos e ferramentas. Segundo estes autores, metodologias não têm a finalidade de selecionar um processo, mas a de criar procedimentos de seleção. As metodologias tendem a ser caminhos generalizados onde uma ampla faixa de problemas de seleção pode se enquadrar, uma estrutura que pode ser adaptada para problemas de seleção individuais; procedimentos formam um algoritmo (constituído de muitas ferramentas), para selecionar um processo por vez ou um conjunto de processos relacionados. Um procedimento é geralmente criado pela aplicação de uma metodologia e, normalmente, é implementado por meio de *softwares*; as ferramentas são utilizadas para solucionar questões específicas durante um procedimento de seleção capturando e manipulando a informação disponível de maneira apropriada.

Em Lovatt e Shercliff (1998b), uma metodologia para seleção de processos de fabricação é apresentada com a finalidade de ser uma estrutura que pode ser adaptada para resolver problemas específicos de seleção; Outro aspecto relevante desse trabalho é a utilização do modelamento técnico e do modelamento de custos como forma de aprimorar a seleção de processos de fabricação.

No trabalho de Ashby *et al.* (2004), os aspectos mais relevantes estão relacionados com as estratégias utilizadas na seleção de materiais e processos de fabricação. Em relação a estas estratégias, os autores argumentam que elas agem como funções de transferência, as quais convertem os requisitos de projeto em uma lista de materiais e processos selecionados. As estratégias propostas por estes autores são a pesquisa livre, a utilização de questionários e

a analogia. Na pesquisa livre, atributos mensuráveis dos requisitos do projeto são selecionados por meio de análise quantitativa. Esta estratégia fornece a possibilidade de inovação, liberdade de escolha, mas pouca orientação no processo de seleção. A estratégia baseada na utilização de questionário aplicado para captar a opinião de especialistas apresenta apenas o retorno de soluções conhecidas, mas com a vantagem de oferecer uma ótima orientação para a atividade de seleção. A estratégia que envolve a analogia com casos passados retorna apenas soluções com as mesmas características adotadas anteriormente, o que limita a possibilidade de inovação (ASHBY *et al.*, 2004).

### 2.2.2 Seleção de Processos nos Estágios Iniciais do Projeto

A seleção de processos de fabricação que ocorre nos estágios iniciais do projeto do componente, correspondendo à etapa de projeto conceitual do desenvolvimento de produtos, tem a finalidade de fornecer opções de fabricação, em termos de forma, materiais e de custo. Nesta etapa, as metodologias de seleção de processos são integradas com metodologias de seleção de materiais, estimação de custos de produção, e outras ferramentas computacionais destinadas a otimizar o projeto do componente. Os principais trabalhos de seleção de processos orientados com base nesta etapa são apresentados a seguir.

No trabalho de Yu *et al.* 1993, uma metodologia de seleção de processos de fabricação que considera simultaneamente vários fatores afetos à seleção de processos, tais como: forma, volume de produção, material; foi desenvolvida para avaliar o processo mais adequado para fabricar um componente. A metodologia é destinada a seleção de processos primários de fabricação. Utiliza as ferramentas de compatibilidade baseada no conhecimento e análise de compatibilidade de projeto para realizar a avaliação dos processos. Um sistema especialista denominado DFPS foi desenvolvido para implementar a metodologia.

Lenau (1996) apresentou uma abordagem para a seleção de processos de manufatura sob a perspectiva da metodologia de Projeto para Manufatura (*Design for Manufacturing*). A abordagem deste autor é direcionada para os estágios iniciais do desenvolvimento e é baseada no acesso à informação e na investigação empírica. Esta metodologia é focada no acesso à informação a partir da qual é possível formular e verificar hipóteses a respeito da seleção de materiais e de processos de fabricação. O sistema denominado *Manufacturing Inspirator* é um banco de dados multimídia que mostra como diferentes materiais e processos de fabricação são utilizados para obter uma ampla gama de produtos industriais. O sistema é composto dos módulos de informação, materiais e processos e o módulo de produtos.

A metodologia de seleção de processos de fabricação proposta por Esawi e Ashby (1998a; 1998b) adiciona uma análise de custo como forma de classificar os processos de fabricação. A metodologia é baseada em duas etapas. Na primeira, denominada *screening*, é uma comparação de atributos exigidos pelo projeto (material, tamanho, forma) com as capacidades de um grande número de processos; o banco de dados possui dados de 125 processos, procurando um subconjunto de processos que é capaz de produzir o componente. Na segunda, denominada *ranking*, o subconjunto de processos é então ordenado com base num critério econômico, o custo de produção do componente. Em Esawi e Ashby (2003) os autores complementam a metodologia com a etapa *supporting information* na qual os processos mais adequados são investigados a fundo, explorando considerações como disponibilidade, experiência da empresa em relação ao processo de fabricação, segurança e aspectos ambientais. Neste mesmo trabalho, os autores classificam as etapas de *screening e ranking* como etapas de pré-seleção e exploram em profundidade a estimação de custo de produção dos processos de fabricação. Um modelo para estimar o custo dos processos com base nos recursos consumidos tais como material, capital, energia e informação, é desenvolvido, e aplicações são apresentadas.

Giachetti (1998) desenvolveu uma metodologia para a seleção de materiais e processos para o estágio inicial do desenvolvimento denominada *material and manufacturing process selection system* (MAMPS). A metodologia MAMPS combina decisão multicritério com banco de dados relacionados para a seleção de material e de processos de fabricação. A metodologia é desenvolvida em dois módulos. No primeiro uma pesquisa simultânea em bancos de dados de materiais e de processos é realizada. A avaliação da compatibilidade entre os requisitos do componente e as alternativas estocadas nos bancos de dados para cada critério é realizada utilizando teoria das possibilidades e conjuntos nebulosos. O segundo módulo agrega os resultados obtidos na seleção de material e de processos. Todos os resultados apresentados pelo MAMPS são apresentados na forma de listas ordenadas. Uma importante contribuição do MAMPS, segundo o autor, é a representação da imprecisão no processo de decisão multicritério. De modo que esta abordagem flexibiliza o questionamento na etapa de desenvolvimento, o que resulta na melhoria do modelo e contribui na tarefa de seleção.

Perzyk e Meftah (1998) desenvolveram uma metodologia para a seleção de processos de manufatura com base na utilização de dados gerais de processos de fabricação, regras de projeto para manufaturabilidade e processamento de materiais. O sistema proposto por estes autores, denominado de *Manufacturing Process Selection System* (MPSS), é composto de dois subsistemas. O primeiro, destinado à avaliação de processos, o *Evaluation System for*



*Manufacturing Processes* (ESMP), e o segundo destinado a projetistas, denominado *Evaluation Alternative Designs* (ESAD). O MPSS tem como principal objetivo auxiliar o projetista a escolher a melhor forma para projetar um componente, o que é feito em duas etapas. Na primeira, cada versão das opções de projeto é analisada do ponto de vista do processo de fabricação mais adequado no ESMP, pela computação do índice de processo (PI). Na segunda, todas as versões são comparadas no ESAD pela avaliação do índice de projeto, a versão com o melhor índice é a escolhida. Pela aplicação do ESMP, um número maior de versões pode ser preparado com orientação para um único processo. O ESMP agrupa as características de processo em três categorias: (i) capacidade de encontrar requisitos funcionais e do usuário; (ii) compatibilidade com regras de projeto para manufaturabilidade; (iii) processabilidade de materiais. O índice de processo é obtido como um vetor de uma função de pertinência triangular de lógica difusa. O banco de dados utilizado para realização da seleção foi desenvolvido em Microsoft Excel.

Chen *et al.* (2000) desenvolveram uma metodologia para seleção de materiais e processos de fabricação. A metodologia consiste em duas etapas. Na primeira, uma árvore de opções de material/processo é construída. Esta árvore de combinações pode ser utilizada para encontrar combinações que satisfaçam os requisitos de projeto, em termos de material, forma e aspectos de produção. O primeiro ramo da árvore representa os processos primários, o ramo abaixo representa os processos secundários e o ramo final representa o componente acabado. Na segunda etapa, ocorre uma avaliação de cada árvore com base em um modelo de custo, por meio de um algoritmo *branch and bound* que escolhe a seqüência de menor custo. Os aspectos diferenciais desta metodologia são: Utiliza banco de dados para materiais (70) e processos (40) independentes, ou seja, novos materiais e processos podem ser adicionados. Auxilia na eliminação de incertezas de parâmetros de projeto, pela apresentação de diferentes combinações de material e processo para serem selecionados. Gera seqüências de processos que atendem aos requisitos de projeto, não existindo restrição em relação ao número de processos utilizados em seqüência; portanto, é possível resolverem-se problemas que necessitem de quatro ou mais processos. É acessível a *web* com um *browser* padrão. A implementação da metodologia foi realizada com um *software* desenvolvido em linguagem Java, com banco de dados em Microsoft Access, e a avaliação de custo dos processos de fabricação foi realizada com o *software* SEER-DFM.

No trabalho de Johnson *et al.* (2002), um método hierárquico de análise de *cluster* da categoria de ligação (*single linkage method*) foi aplicado no agrupamento de materiais e processos, com o objetivo de auxiliar no projeto de componentes. Nesse trabalho quarenta

materiais foram agrupados com base em oito propriedades técnicas e dez propriedades estéticas, obtendo-se dois agrupamentos distintos. Também foram agrupados quarenta e nove processos de fabricação com relação aos materiais que podem ser processados e às formas que podem ser obtidas por estes processos de fabricação, como no agrupamento dos materiais foram obtidos dois agrupamentos distintos. Segundo estes autores, o agrupamento de materiais e processos leva a uma rápida recuperação da informação e também contribui para inspiração, pois o agrupamento permite ao projetista avaliar a similaridade de dois materiais ou processos, estimulando a inovação e sugerindo possíveis substituições.

Santos e Ferrante (2003) desenvolveram uma metodologia destinada à seleção de materiais com base no conceito de índice de mérito, uma equação algébrica que expressa o compromisso entre duas propriedades do material. A metodologia é desenvolvida com o auxílio de mapas de propriedades de materiais; a seleção do processo de fabricação é realizada a partir da seleção do material para o componente por meio das propriedades obtidas com o processo de fabricação.

A abordagem proposta por Zha (2005) enfoca a seleção de materiais e de processos de fabricação. O método proposto por este autor utiliza uma nova metodologia baseada em inteligência de conhecimento intensivo com utilização de lógica difusa, para avaliar e selecionar materiais e processos de fabricação, ordenados em termos de custo total de fabricação. O método proposto foi implementado pelo WebMCSS (*Web-based Knowledge-intensive Manufacturing Consulting Service System*) com uma arquitetura de cliente-servidor de conhecimento e uma estrutura de suporte para seleção de processos de fabricação e material via *web* utilizando linguagem Java.

### 2.2.3 Seleção de Processos na Etapa de Planejamento do Processo

Na etapa de desenvolvimento de produto relativa ao projeto detalhado, a seleção de processos de fabricação assume um outro papel, o de auxiliar no planejamento do processo (*Process Planning*), por meio de informações relativas ao ferramental utilizado, equipamentos necessários e otimização de parâmetros de processo e obtenção do custo de fabricação mais preciso. A seguir, são apresentados trabalhos relativos a interface seleção de processos com o planejamento de processo.

A metodologia *computer oriented materials, processes and apparatus selection system* (COMPASS), desenvolvida por Chan *et al.* (1998), é baseada na abordagem de *Meta Planning*, que é uma alternativa no contexto da Engenharia Simultânea para aproximar as

áreas de projeto e fabricação no estágio inicial do desenvolvimento. Um *Meta Planner* pode ser integrado a sistemas CAD/CAPP/CAM existentes para atingir um alto nível de automatização no planejamento do processo. O COMPASS foi desenvolvido como um *Meta Planner* e possui uma estrutura de trabalho voltada a providenciar informação essencial com respeito a custo de produção, tempo de ciclo e qualidade dos produtos de todos os processos candidatos. O COMPASS é uma ferramenta que ajuda o engenheiro de projeto a identificar potenciais problemas de fabricação nos estágios iniciais do desenvolvimento de produtos.

No trabalho de Maropoulos *et al.* (1998), um sistema CAPP denominado CAPABLE (*Concurrent Assembly and Process Assessments BLocks for Engineering manufacture*) foi desenvolvido para a fase inicial do planejamento de processo (*aggregate process planning*). Em termos de controle de custos, tempo de desenvolvimento de produtos e qualidade é a fase mais importante do planejamento de processo. As principais funções do CAPABLE estão relacionadas à identificação de requisitos tecnológicos para a produção, seleção de processo e equipamentos para a produção, geração do planos de produção, avaliação da configuração de fábrica e a rápida avaliação de cenários, nos quais há o efeito de configurações do produto sobre o planejamento do processo. O sistema foi desenvolvido para o processo de usinagem. A rotina de seleção de processos foi realizada com base na seleção de todas as rotas possíveis para fabricar o componente por meio da otimização com algoritmo genético da função objetivo de custo global de fabricação.

Gayretli e Abdalla (1999) desenvolveram um sistema CAPP em um contexto de Engenharia Simultânea em que o ponto principal do trabalho é a avaliação e a otimização dos processos de fabricação nos estágios iniciais do desenvolvimento. O sistema proposto por esses autores é composto de um sistema de modelamento sólido, uma interface para o usuário, representação do projeto, um módulo de gerenciamento de consistência, um sistema baseado em restrições, um módulo de análise de manufaturabilidade e otimização de processo e várias outras fontes de conhecimentos. O módulo de otimização de processos, por sua vez, é composto por um banco de dados de formas, requisitos do projetista, restrições dos processos de fabricação, avaliação e otimização e uma interface do usuário. O sistema seleciona os processos candidatos com base nas formas por meio de pesquisa no banco de dados. O módulo de restrições dos processos de fabricação contém informações como: tipo de forma, material, custo e tempo. Em conjunto, o módulo de avaliação e otimização por meio de regras e estruturas promove a otimização dos processos de fabricação do componente. Baseado nas restrições de fabricação, o sistema seleciona os processos possíveis com o tempo e o custo de

cada processo. Os autores comentam que a utilização do sistema proporcionou uma redução considerável no custo do produto e no *lead time*.

Feng e Zhag (1999) apresentaram a abordagem de planejamento de processo conceitual *Conceitual Process Planning* (CPP) que visa integrar o planejamento de processo ao projeto. O CPP é destinado a projetistas para avaliarem-se aspectos de manufaturabilidade e de custo de fabricação nos estágios iniciais do desenvolvimento de componentes mecânicos. O CPP apresenta três atividades principais, a seleção de processos de fabricação, a seleção de recursos de fabricação e a estimativa dos custos de fabricação. As atividades principais são subdivididas para facilitar a aplicação. A etapa de seleção de processos de fabricação compreende as sub-atividades de selecionar o processo com base no material, na quantidade, na forma e nas tolerâncias. A atividade de seleção dos recursos de fabricação conta com as sub-atividades de seleção de máquinas/equipamentos, seleção de ferramentas e acessórios e seleção de trabalho especializado. A estimativa do custo de fabricação é feita com base em equações. Na estimativa do custo de um componente considera-se o custo do material, do capital em uso e para comprar equipamentos, da mão de obra e o custo de despesas gerais. A metodologia foi implementada via *software*.

Feng e Song (2000) descrevem em detalhes o fluxo de dados a ser utilizado na metodologia CPP de Feng e Zhag (1999). A descrição do fluxo de dados é realizada com a representação gráfica IDEF0. Um modelo para a atividade de seleção de recursos é proposto em linguagem UML (*unified modeling language*). A estimativa dos custos de fabricação é complementada com a introdução do método de custeio ABC (*Activity Based Costing*). A avaliação do tempo de fabricação e o tempo de *setup* são introduzidos no CPP.

Long *et al.* (2002) desenvolveram um módulo de seleção de processos para um sistema CAPP generativo, para ser aplicado ao processo de extrusão a frio. Como resultados o módulo de seleção fornece opções de processos de extrusão para produzir as características desejadas do componente e também fornece uma avaliação da conformabilidade do componente. A base para o desenvolvimento do módulo de seleção consistiu na elaboração de um sistema de classificação de forma geométrica. Neste sistema as formas geométricas dos componentes extrudados foram classificadas em três categorias, formas de haste, formas de copos e formas tubulares. A partir desta classificação se estabeleceu um mapeamento das características de cada forma geométrica em relação aos processos de extrusão que poderiam obter estas formas por meio de regras Se-Então. Os valores das variáveis críticas de conformação de cada característica de uma forma foram comparados com os limites de

conformabilidade associados com diferentes matérias desta maneira a conformabilidade de um componente pode ser avaliada.

O principal objetivo do trabalho de Swift e Booker (2003) foi providenciar suporte para a seleção de processos de manufatura em termos de exequibilidade tecnológica, qualidade e conformidade de custos de fabricação. Esses autores argumentam que a aplicação de ferramentas e técnicas para quantificar os problemas de manufatura e de montagem, identificando oportunidades para reprojeto é um dos melhores meios disponíveis para reduzir o *gap* entre o conhecimento e a execução do desenvolvimento de produtos. A análise de DFM/DFA conduz a soluções inovadoras de projeto em que consideráveis benefícios provêm, incluindo desempenho funcional e grandes economias nos custos de fabricação e montagem. DFA é particularmente poderosa nesta conexão e é uma das mais valiosas técnicas de introdução de produtos. Os autores citados desenvolveram o PRIMAS (*Process Information Maps*) sob a perspectiva das metodologias DFM/DFA. Para cada processo, o PRIMAS fornece de forma padronizada conhecimento e dados que incluem adequação de material, considerações de projeto, questões de qualidade e econômicas e processos fundamentais e variantes.

#### 2.2.4 Seleção de Processos na Etapa de Produção

A seleção de processos aplicada na etapa de produção é orientada à seleção de processos membros de uma mesma classe conforme taxonomia proposta por Ashby *et al.* (2007). Em relação a esses trabalhos, pode-se observar que, na etapa de produção, a seleção de processos é direcionada para a solução de problemas específicos, com a utilização de um conjunto amplo de informações para um número menor de processos. A seguir, são apresentados trabalhos de seleção de processos orientados com base nesta etapa.

Parkan e Wu (1996) argumentam que a seleção do processo de fabricação tem impacto direto sobre a eficiência e qualidade, que determinam o preço e a satisfação do cliente e eventualmente, a competitividade de seus produtos. Esses autores pesquisaram sobre a utilização de dois métodos de decisão multicritério para avaliar a seleção de processos de fabricação de semicondutores. Os métodos estudados foram o TOPSIS (*technique for order preference by similarity to ideal solution*) e o OCRA (*operational competitiveness rating*). Os processos avaliados foram os utilizados na produção em relação a três outros processos similares. Os resultados mostraram que o processo adotado pela empresa foi selecionado como

melhor opção e que o método TOPSIS apresentou-se como método de avaliação mais adequado em relação aos dados avaliados.

Os trabalhos de Esawi e Ashby (2004), Ravisankar *et al.* (2006) e Correia e Ferraresi (2007) são destinados à seleção de processos de soldagem. No trabalho de Esawi e Ashby (2004) um software denominado *Joining Selector* apoiado em um banco de dados contendo 53 processos de soldagem permite selecionar os requisitos de projeto por meio de pesquisa nos atributos dos processos. Em Ravisankar *et al.* (2006), três processos de soldagem GMAW (*gas metal arc welding*), GTAW (*gas tungsten arc welding*) e PAW (*plasma arc welding*) foram avaliados em relação a dez critérios diferentes relativos a características produtivas, de custo, e operacionais, por meio do método AHP de decisão multicritério. No trabalho de Correia e Ferraresi (2007) foram avaliados dois processos de soldagem GMAW e SAW (*submerged arc welding*) em relação a dois critérios: custo operacional e custo da não qualidade.

Os trabalhos de Jain e Jain (2003) e Chakraborty e Dey (2007) são destinados à seleção de processos de usinagem não convencionais. Em Jain e Jain (2003) uma metodologia para seleção de processos não convencionais e avançados de usinagem é descrita juntamente com uma estratégia de seleção preliminar para alguns tipos de processos de fabricação básicos. Estas duas tarefas, juntamente com a otimização paramétrica, formam o núcleo de um sistema de planejamento de processo integrado e automatizado. A metodologia de seleção de processo é baseada na estratégia de eliminação e classificação. Para facilitar o processo de seleção, de acordo com os autores, os processos foram reclassificados de acordo com material a que se aplicam, forma ou capacidade de fabricar determinadas características, capacidades operacionais e aspectos econômicos e ambientais dos processos. A metodologia foi implementada por um software denominado de APSPOAMPS (*Automated Process Selection and Parametric Optimization of AMPs*). O número de processos de usinagem considerados foi doze. Em Chakraborty e Dey (2007), sete processos de usinagem não convencional foram avaliados por meio de um método de seleção baseado no QFD (*quality function deployment*) o qual serviu de base para o desenvolvimento de um sistema especialista. Segundo os autores, a abordagem adotada permitiu selecionar o melhor processo e, também, fornecer um estudo comparativo entre os processos alternativos.

### 2.2.5 Considerações Sobre Seleção Processos de Fabricação

A análise deste conjunto de trabalhos, a respeito de seleção de processos, foi fundamental para o aprofundamento dos conhecimentos sobre as soluções e dificuldades encontradas por outros pesquisadores em relação ao tema de seleção de processos de fabricação. Os aspectos mais relevantes sobre os trabalhos de seleção de processos analisados são relatos a seguir:

- (i) a seleção de processos, no desenvolvimento do componente ou na etapa da produção, deve ser realizada o mais cedo possível para que os melhores resultados de redução de custos e de tempo de desenvolvimento sejam obtidos;
- (ii) a relação de compatibilidade entre o material e o processo de fabricação deve ser considerada no desenvolvimento de um método de seleção de processos de fabricação;
- (iii) a avaliação de custos é um componente chave na criação de métodos de seleção de processos de fabricação;
- (iv) a utilização de métodos de decisão multicritério na seleção de processos é relatada na literatura;
- (v) na aplicação de métodos de seleção para a etapa de produção, observa-se a escolha de um menor número de processos, mas com um detalhamento maior dos mesmos;
- (vi) o desenvolvimento de aplicativos computacionais a partir de métodos de seleção de processos é observado em praticamente todos os trabalhos analisados na literatura.

### 2.3 SELEÇÃO DE PROCESSOS DE FUNDIÇÃO DE METAIS

Nesta seção, são apresentados trabalhos relativos à seleção de processos de fundição de metais. Apenas trabalhos que propõem metodologias ou métodos de seleção serão analisados. Trabalhos que empregam uma ferramenta para realizar a seleção, como em Tiwari e Banerjee (2001) que utilizam o método AHP para realizar a seleção de processos de fundição de metais não serão relatados. Em trabalhos com duas versões, como em Er, Sweeney e Kondic (1996) e Er e Dias (2000), em que as ideias básicas do método são similares, analisou-se apenas o trabalho mais recente. A Tabela 4 apresenta os trabalhos selecionados para análise.

Tabela 4 - Principais métodos de seleção de processos de fundição de metais

<b>Autores</b>	<b>Características do método</b>
Sirilertworakul <i>et al.</i> (1993)	Sistema Especialista
Darwish e El-Tamimi (1996)	Sistema Especialista
Akarte <i>et al.</i> (1999)	Multicritério e Lógica Difusa
Er e Dias (2000)	Sistema Especialista
Karthik <i>et al.</i> (2003)	Multicritério
Allison <i>et al.</i> (2006)	Modelamento Físico
Akarte e Ravi (2007)	Multicritério e Lógica Difusa
Daws <i>et al.</i> (2008)	Multicritério e Lógica Difusa

FONTE: Autor.

### 2.3.1 Método de Sirilertworakul, Webster e Dean (1993)

No trabalho de Sirilertworakul *et al.* (1993), um sistema especialista assistido por computador para realizar a seleção da liga e do processo de fundição, foi desenvolvido. A finalidade do sistema é auxiliar projetistas no desenvolvimento de componentes fundidos e também reter conhecimento tácito de especialistas no processo de fundição, que segundo os autores, não se encontra disponível em literatura técnica ou *softwares*. A seleção se inicia com a escolha da liga. O módulo de seleção da liga do componente possui um banco de dados com as ligas para fundição de alumínio, cobre, ferro fundido e aço. A liga pode ser escolhida com base na composição química, em propriedades de Engenharia e especificação internacional (normas). O módulo de seleção de processos conta com 11 processos de fundição. A seleção do processo de fundição é realizada em duas etapas: na primeira, o sistema avalia a compatibilidade da liga a ser fundida com os processos disponíveis no banco de dados. O sistema retorna apenas os processos mais compatíveis com a liga. Na segunda etapa, as especificações do componente a ser produzido como peso, espessura de seção mínima e menor diâmetro de furo a ser produzido, são informadas. O processo mais adequado para se obter as especificações do componente dentre os processos compatíveis com liga é o processo recomendado para aplicação.

### 2.3.2 Método de Darwish e El-Tamimi (1996)

Darwish e El-Tamimi (1996) desenvolveram um sistema especialista com a finalidade de auxiliar projetistas na tarefa selecionar o processo de fundição mais adequado para se produzir um componente. Os processos contemplados no sistema são: moldagem manual e



automatizada em areia a verde, molde permanente (gravidade), *shell molding*, *plaster molding*, cera perdida (*lost wax*), fundição sob pressão (*die casting*) e fundição centrífuga. O sistema especialista foi desenvolvido por meio do *software Rule Expert*. Neste *software*, o conhecimento é adquirido por meio de exemplos, regras, encadeamento de dados para frente e para trás, bem como incertezas são contempladas no *software*, assim como um assistente de explicações para o usuário entender o processo de raciocínio utilizado para obter a solução. O sistema especialista destes autores foi estruturado em hierarquia modular, com quatro módulos. O módulo de projeto possui como critérios para seleção o tipo de material, espessura mínima de seção e o peso do componente. O módulo de produção com os critérios de volume de produção e de taxa de produção. O módulo de fabricação, com os critérios de qualidade superficial e precisão dimensional. O módulo de *trade-off* com os critérios de custo e resistência mecânica. São apresentados exemplos de seleção de componentes fundidos.

### 2.3.3 Método de Akarte, Ravi e Creese (1999)

Akarte *et al.* (1999) desenvolveram uma metodologia para seleção de processos de fundição de metais, baseada na compatibilidade do componente com o processo de fundição. Esses autores utilizaram dezenove critérios de seleção, divididos em quatro grupos, ou seja, critérios de projeto, qualidade, produção e de custo. O conjunto de critérios utilizados pelos autores é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Critérios adotados no trabalho de Akarte *et al.* (1999) para seleção de processos de fundição

Grupo	Critérios	Classificação		
		Crítico	Objetivo	Subjetivo
Projeto	Material	√		
	Peso	√		
	Tamanho	√		
	Quantidade	√		
	Tamanho mínimo macho	√	√	
	Espessura mínima de seção	√	√	
	Complexidade de forma		√	
Qualidade	Tolerância na linha de partição		√	
	Tolerância fora linha de partição		√	
	Rugosidade superficial		√	
	Detalhamento superficial			√
Produção	Porosidade interna			√
	Taxa de produção		√	
	<i>Lead time</i>			√
	Utilização de Material			√

Continua

Tabela 5 - Conclusão

Custo	Custo de ferramental	√
	Custo mão de obra direta	√
	Custo de equipamento	√
	Custo de acabamento	√

FONTE: Akarte *et al.* (1999).

Conforme classificação da Tabela 5, os critérios podem ser críticos, objetivos e subjetivos. Os critérios críticos são utilizados para separar os processos factíveis dos processos candidatos. Os critérios objetivos e subjetivos utilizados para avaliar a compatibilidade do componente com o processo. A metodologia emprega como ferramentas o método AHP, utilizado para atribuir pesos relativos aos critérios e a lógica difusa usada no tratamento dos critérios objetivos, para estabelecer o grau de compatibilidade entre os requisitos do componente e o processo de fundição. Os critérios subjetivos são descritos em termos de variáveis lingüísticas (baixo, baixo a médio, médio, médio a alto, alto, alto a muito alto e muito alto) são classificados entre (0 e 1) com base no modelo de peso linear que atribui os valores de (0, 0.167, 0.333, 0,50, 0.667, 0,83 e 1,0) para as variáveis lingüísticas. Os critérios objetivos têm a sua compatibilidade avaliada por meio de lógica difusa, com a utilização de funções de pertinência triangulares e trapezoidais, com valores entre 0 e 1, sendo o valor 1 atribuído a um requisito de maior compatibilidade com o processo. Etapas do método: (i) determinar o valor da compatibilidade dos processos factíveis com relação a cada critério; (ii) obter um índice de compatibilidade de cada processo factível, pela soma dos valores de compatibilidade de cada critério pela multiplicação do respectivo peso; (iii) ordenar os processos factíveis de acordo com o índice de compatibilidade; (iv) propor melhorias de compatibilidade entre o processo selecionado e o componente por meio de mudanças no projeto do componente. A metodologia foi implementada com auxílio de um software denominado CPPC (*casting product-process compatibility evaluation and design improvement*).

#### 2.3.4 Método de Er e Dias (2000)

Er e Dias (2000) expuseram os parâmetros da seleção de processos de fundição e suas interações, apresentados na Figura 6, e a partir destes desenvolveram um sistema especialista destinado à seleção de processos de fundição denominado *Casting Process Selector*.

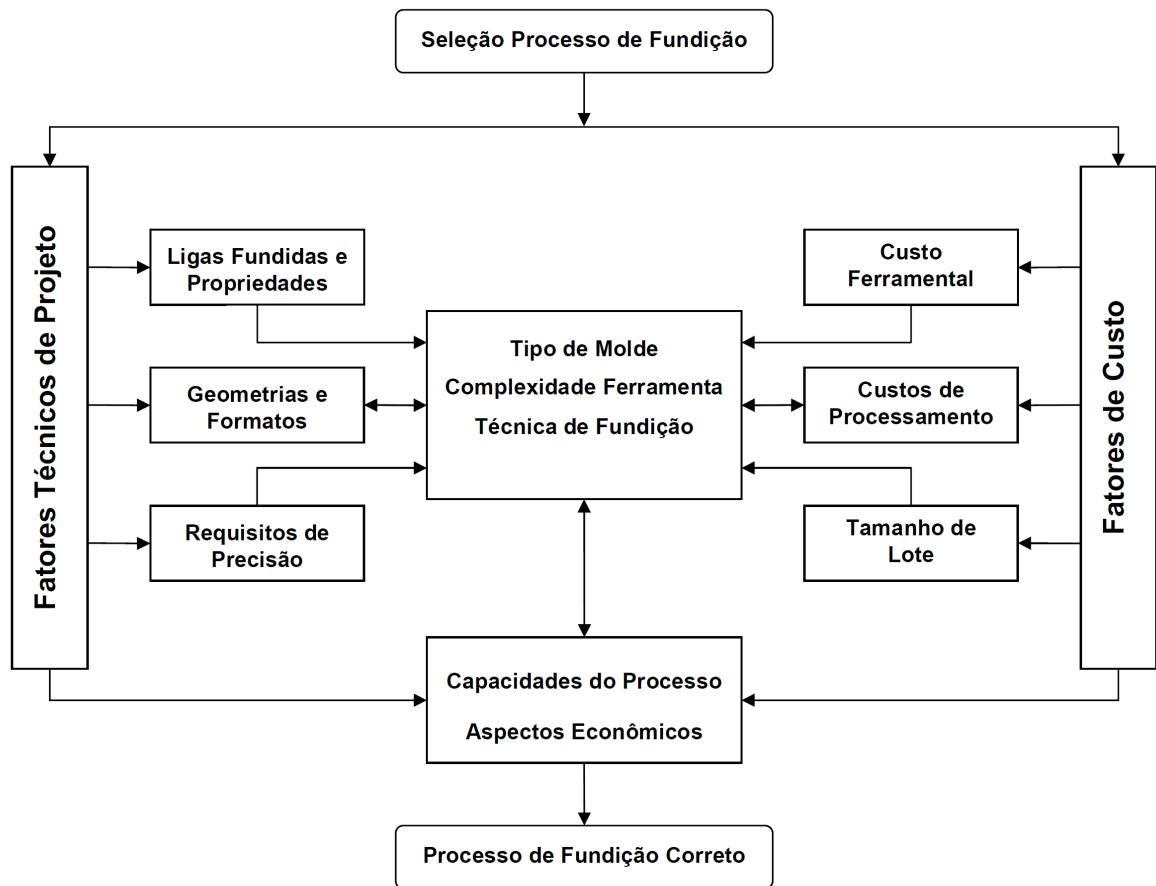


Figura 6 - Parâmetros da seleção de processos de fundição e suas interações no *Casting Process Selector*

FONTE: Er e Dias (2000).

O sistema especialista foi desenvolvido com base no *software Crystal by Intelligent Enviroments*. Neste *software*, a base de conhecimento é construída por meio de regras Se-Então. O *Casting Process Selector* possui uma estrutura modular, com cinco módulos dispostos em níveis, nos quais a seleção do processo evolui ao longo dos níveis. No primeiro nível, a liga do componente é informada com base nas propriedades mecânicas (dureza, resistência mecânica, alongamento) ou escolhidas no menu. No segundo nível, os aspectos relativos à geometria do componente, tais como, espessura de seção, comprimento, peso, aspectos de forma, cavidades, são inseridos. No terceiro nível, fatores relacionados com a precisão do componente como tolerâncias e acabamento superficial, são introduzidos. No quarto nível, a quantidade a ser produzida, é informada. O tamanho do lote do componente é utilizado para avaliar os custos de ferramental por meio de regras práticas e eliminar processos incompatíveis em termos de custo de ferramental em relação à quantidade a ser produzida. No quinto nível, uma comparação de custo dos processos pré-selecionados é realizada por meio de heurísticas. Todas as etapas para o desenvolvimento do sistema

especialista foram detalhadas. Os autores argumentam que o *Casting Process Selector* é destinado a auxiliar projetistas na seleção de processos de fundição, permitindo a redução do tempo de desenvolvimento, acertando o processo e ferramental na primeira tentativa e contribuindo com uma ferramenta de treinamento.

### 2.3.5 Método de Karthik, Chung, Ramani e Tomovic (2003)

Karthik *et al.* (2003) desenvolveram uma metodologia para seleção de processos de fundição de metais, aplicada por meio de um sistema desenvolvido para *web*, o *Metalcasting Process Advisor* (MPA).

O MPA utiliza como critérios de seleção o material, a quantidade de componentes a serem produzidos, peso, espessura da seção, tolerância dimensional e a rugosidade superficial. As informações consideradas no MPA são as faixas de capacidades dos processos de fundição normalmente atingíveis e aquelas faixas não usuais. O MPA considera 16 processos de fundição de metais e 25 ligas e metais diferentes na sua base de dados.

Os autores discutem que, para se realizar a seleção do processo de fundição de metal mais adequado, não é necessária a utilização de todos os critérios, e argumentam que o uso de todos os critérios depende das características do componente em análise.

No desenvolvimento do processo de seleção, o MPA utiliza um sistema de atribuição de pesos aos critérios, sendo atribuído peso 0 ao critério não importante (não utilizado na seleção) e 5 ao critério considerado muito importante. Os pesos são empregados com dois propósitos: para indicar a importância de um critério de entrada em relação aos demais critérios; para favorecer um processo que atenda aos requisitos solicitados dentro da sua faixa usual de capacidades. Os critérios com peso 0 não são utilizados na seleção. Os resultados de cada critério e o resultado final são apresentados na forma de gráficos.

Segundo os autores, o MPA foi testado em exemplos obtidos de *Handbooks* e desenhos de fundição, ou seja, componentes produzidos por fundições, obtendo resultados positivos de desempenho. Mas, segundo os autores, mais estudos são necessários para validar o MPA.

Os autores concluem que uma das mais importantes contribuições do MPA é o detalhamento das capacidades produtivas dos diferentes processos de fundição de metais e pretendem inserir os critérios de complexidade de forma, *lead time*, tolerância na linha de partição e dados sobre custos de fabricação dos processos de fundição ao sistema.

### 2.3.6 Método de Allison, Li, Wolverton e Su (2006)

No trabalho de Allison *et al.* (2006), a metodologia denominada *Virtual Aluminum Castings*, desenvolvida e implementada na *Ford Motor Company*, demonstra a aplicação do modelamento físico na seleção de processos. A metodologia proposta pelos autores é composta por cinco etapas de modelamento físico e três etapas de verificação dos requisitos de projeto. As etapas de modelamento físico compreendem o modelamento do processo de fundição e tratamento térmico, a predição da microestrutura e de propriedades do material em regiões localizadas do componente, a predição da tensão residual do componente e a predição da vida, em serviço, do componente. As etapas de avaliação são compostas por verificar se a fundibilidade do componente foi assegurada, se as propriedades observadas nas etapas de modelamento atingem os requisitos de projeto e a avaliação final verifica se o produto e o processo foram otimizados.

### 2.3.7 Método de Akarte e Ravi (2007)

Akarte e Ravi (2007) desenvolveram uma metodologia multicritério destinada a realizar a seleção de processo de fundição juntamente com a seleção do fornecedor (fundição). O método de seleção utilizado nesse trabalho é similar ao adotado em Akarte *et al.* (1999). As principais diferenças residem na utilização de um número maior de critérios e na introdução do conceito de fundição ideal. No trabalho, vinte e cinco critérios são utilizados, sendo onze critérios objetivos e quatorze subjetivos, agrupados em seis categorias: qualidade, produção, aspectos geométricos, entrega, instalações e outras capacidades. Os critérios objetivos foram avaliados baseados em lógica difusa e os critérios subjetivos numa classificação com base em variáveis lingüísticas. O método AHP foi utilizado para atribuir peso aos critérios. As etapas da metodologia são as seguintes: (i) seleção de um processo apropriado e do fornecedor; (ii) avaliar a compatibilidade entre os requisitos de um produto e as capacidades de um processo/fornecedor; (iii) melhorar o projeto do produto pela maior compatibilidade. Os autores definem o conceito de fundição ideal como “uma fundição hipotética que possui as melhores instalações da classe e fornece a maior compatibilidade produto-processo, comparada com fundições reais na mesma categoria de metais processados”. O conceito de fundição ideal não só permite encontrar o processo de fundição mais adequado para um determinado conjunto de requisitos do produto, mas também é útil para avaliar uma determinada fundição, em relação aos requisitos do produto. Ainda segundo

os autores, a metodologia proposta também é útil como *benchmarking* para fundições e para dar retorno a respeito da compatibilidade produto-processo.

### 2.3.8 Método de Daws, Al-Dawood e Al-Kabi (2008)

Daws *et al.* (2008) desenvolveram um sistema para auxiliar a seleção de processos de fundição de metais na etapa do estágio inicial do desenvolvimento do componente. O *Computer Aided Casting Process Selection* (CACPS). O método é baseado na utilização de um índice que avalia a compatibilidade de cada processo de fundição com os requisitos do componente em análise. Os dados dos processos de fundição de metais utilizados no método estão na forma de funções de pertinência de lógica difusa e variáveis linguísticas. Com base nestas características, este método apresenta muitas similaridades com o método proposto por Akarte *et al.* (1999).

O CACPS é composto por duas etapas-separação e classificação. Na etapa de separação, os critérios utilizados são material, forma do componente e quantidade requerida. Na etapa de classificação, quatro grupos de critérios são utilizados, os quais são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Critérios utilizados na classificação do CACPS

<b>Atributos Geométricos</b>	<b>Requisitos de Qualidade</b>	<b>Requisitos de Produção</b>	<b>Considerações Econômicas</b>
Tamanho	Acabamento superficial	Volume de produção	Custo ferramental
Peso	Propriedades Mecânicas	Taxa de produção	Custo por unidade
Espessura de seção	Complexidade	Flexibilidade	Custo relativo em quantidade
Tamanho do furo	Porosidade	<i>Lead time</i>	Custo em pequenas quantidades
Tolerância			Custo mão de obra

FONTE: Daws *et al.* (2008).

Os autores concluem que o método apresenta a vantagem de classificar todos os processos, inclusive os que não foram indicados como a melhor opção. Uma das principais contribuições destes autores é a justificativa da utilização das capacidades dos processos na forma de dados *fuzzy* e do emprego de dados na forma de variáveis linguísticas.

### 2.3.9 Considerações sobre Métodos de Seleção Processos de Fundição de Metais

A análise dos principais métodos de seleção de processos de fundição de metais apresentados na literatura corresponde a primeira etapa do desenvolvimento desta tese. Esta etapa tem a finalidade de identificar aspectos positivos dos métodos existentes e suas principais deficiências com a finalidade de propor melhorias (inovações) a serem desenvolvidas nesta tese. Com base nesta abordagem, as considerações a respeito dos trabalhos analisados nesta seção, são divididas em duas categorias:

I) Aspectos positivos dos métodos existentes na literatura que devem ser mantidos no desenvolvimento do método de seleção de processos de fundição de metais desta tese:

(i) os critérios necessários a seleção estão bem identificados e envolvem aspectos de projeto, qualidade e de produção;

(ii) a forma de apresentação das informações utilizadas nos métodos de seleção (*Fuzzy* e variáveis linguísticas), são os mais adequados para representar as capacidades dos processos de fundição de metais e, também para capturar diferenças existentes entre as capacidades produtivas exibidas pelas fundições.

II) Aspectos não abordados nos métodos existentes na literatura que podem ser considerados como oportunidades de melhoria e contemplados no desenvolvimento do método de seleção de processos de fundição de metais desta tese:

(i) em relação às informações utilizadas nos métodos de seleção de processos de fundição não são mencionados procedimentos de obtenção (origem), números de fontes e procedimentos empregados no processamento destas informações;

(ii) aspectos ambientais não são considerados como critérios técnicos para seleção de processos de fundição de metais;

(iii) emprego da estimação dos custos de fabricação, para desenvolver uma estratégia de seleção baseada em avaliação econômica não é utilizada, apesar de ser mencionada de forma qualitativa;

(iv) necessidade da utilização de métodos de decisão multicritério compatíveis com dados *Fuzzy*.

Estas considerações foram tomadas como diretrizes na elaboração do método de seleção de processos de fundição de metais desta tese.

## 2.4 PRINCIPAIS FERRAMENTAS UTILIZADAS NA SELEÇÃO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Segundo Lovatt e Shercliff (1998a), ferramentas são utilizadas para solucionar questões específicas durante um procedimento de seleção de processos de fabricação capturando e manipulando a informação disponível de maneira apropriada. Exemplos de ferramentas incluem gráficos de capacidade do processo (SWIFT e BOOKER, 2003), banco de dados (ESAWI e ASHBY, 2004), modelamento físico (ALLISON *et al.*, 2006), sistemas especialistas (DARWISH e EL-TAMIMI, 1996; CHAN *et al.*, 1998; ER e DIAS, 2000; CHAKRABORTY e DEY, 2007), lógica difusa (PERZYK e MEFTAH, 1998); ZHA, 2005), métodos de decisão multicritério, TOPSIS (PARKAN e WU, 1996), AHP (RAVISANKAR *et al.*, 2006), *Fuzzy-AHP* (DURAN e AGUILO, 2008), QFD-AHP (NAGAHANUMAIAH *et al.*, 2008), lógica difusa e AHP (AKARTE *et al.*, 1999), custo de fabricação (ESAWI e ASHBY, 1998; 2003), custos da não qualidade (CORREIA e FERRARESI, 2007).

As ferramentas empregadas nesta tese, decisão multicritério discreta, AHP e modelamento técnico de custo são descritas nesta seção.

### 2.4.1 Análise de Decisão Multicritério

Segundo Belton e Stewart (2002), a análise de decisão multicritério (*multicriteria decision analysis*) é um termo que descreve um conjunto de abordagens formais, levando em consideração vários critérios e, tem como finalidade auxiliar um indivíduo, ou um grupo, na determinação da decisão mais importante.

Com base na definição apresentada acima, Mendonza e Martins (2006) discutem as dimensões que compõem uma abordagem de análise de decisão multicritério. Segundo estes autores, elas compreendem: (i) abordagem formal, (ii) presença de vários critérios, e (iii) decisões tomadas por indivíduos ou grupos de indivíduos.

Os métodos de análise de decisão multicritério podem ser agrupados em duas categorias principais: (i) decisão multiobjetivo ou otimização vetorial; (ii) decisão multiatributo ou decisão multicritério discreta (TRIANANTAPHYLLOU, 1999). A principal distinção entre as duas categorias de métodos baseia-se no número de alternativas sob avaliação.

Nos métodos de decisão multiobjetivo o espaço de decisão é contínuo (número infinito de alternativas), e são descritas por funções objetivo que devem ser satisfeitas



simultaneamente. Os processos de decisão envolvem a busca pela melhor solução, normalmente por meio de programação matemática (KAHRAMAN, 2008).

Nos métodos de decisão multicritério discreta, a tomada de decisão se concentra em como selecionar ou classificar as diferentes alternativas, considerando-se apenas um número predeterminado de alternativas sob avaliação (KAHRAMAN, 2008). Segundo este autor, as abordagens de decisão multicritério discreta podem ser vistas como métodos alternativos para combinar a informação em uma matriz de decisão em conjunto com informações adicionais do tomador de decisão, com a finalidade de obter-se a classificação final, a seleção ou escolha entre as alternativas. Ainda segundo Gomes *et al.* (2004), a decisão multicritério discreta tem a finalidade de possibilitar a transparência e a sistematização do processo referente aos problemas de tomada de decisão. Existem muitos métodos de seleção multicritério discreta. No trabalho de Kahraman *et al.* (2008), são listados 20 diferentes tipos de métodos de decisão multicritério discreta. Destes, destacam-se os métodos de ponderação aditiva simples, ponderação multiplicativa, AHP (*Analytic Hierarchy Process*, NCIC (*Nontraditional Capital Investment Criteria*), TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), ANP (*Analytic Network Process*), DEA (*Data Envelopment Analysis*) e *Multi-Attribute Fuzzy Integrals*.

O método de ponderação aditiva simples é, provavelmente, o mais conhecido e amplamente utilizado método de decisão multicritério discreta. O resultado final do desempenho de uma alternativa é calculado como a soma ponderada de todos os valores de seus atributos em relação aos critérios (KAHRAMAN *et al.*, 2008). Na ponderação aditiva simples, deve-se realizar a normalização quando os critérios avaliados possuem unidades diferentes (YOON E HANG, 1995).

Segundo Roy (1996), métodos de decisão multicritério discreta são destinados à solução de quatro tipos diferentes de problemas (*problématique*) listados a seguir:

- (i) problema de escolha (P. $\alpha$ ): o método de decisão multicritério tem como finalidade facilitar a decisão pela escolha de um subconjunto mais restrito possível, para a escolha de uma única alternativa como solução;
- (ii) problema de separação (P. $\beta$ ): o método de decisão multicritério auxilia na realização de ações de classificação baseado em normas ou procedimentos de indicação, para a alocação das alternativas em classes ou categorias;
- (iii) problema de ordenação (P. $\gamma$ ) - o método de decisão multicritério auxilia na realização de classificação em ordem decrescente de preferência, ou de procedimentos de ordenação;

(iv) problema de descrição (P. $\delta$ ) - o método de decisão multicritério auxilia na descrição das ações das alternativas e de suas consequências de uma maneira sistemática e formalizada.

Segundo Gomes *et al.* (2004), os tipos de problemas definidos por Roy (1996) não são independentes entre si, por exemplo, a ordenação das alternativas P. $\gamma$ , pode servir de base para resolver um problema P. $\alpha$  ou P. $\beta$ .

A conceituação e a análise dos métodos de análise de decisão multicritério são fundamentais para o desenvolvimento do método multicriterial de seleção de processos de fundição de metais. Pelas características apresentadas, pelo problema de seleção de processos de fundição de metais, a decisão multicritério discreta caracteriza-se como a abordagem mais adequada a ser utilizada. Os problemas a serem abordados pelo método multicriterial a ser desenvolvido nesta tese são de natureza P. $\alpha$ , P. $\beta$  e P. $\gamma$ .

#### 2.4.2 Método Hierárquico Analítico de Decisão Multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

Os primeiros métodos de apoio ou auxílio multicritério à decisão surgiram na década de 70. Esses métodos têm um caráter científico e, ao mesmo tempo, subjetivo, com a finalidade de possibilitar a transparência e a sistematização do processo referente aos problemas de tomada de decisões (GOMES *et al.* 2004). Um dos principais métodos de decisão multicritério discreto é o método hierárquico analítico de decisão multicritério ou *Analytic Hierarchy Process* (AHP) desenvolvido por Saaty (1977).

O AHP é uma teoria matemática para deduzir vetores de prioridade, a partir de matrizes recíprocas positivas com entradas estabelecidas por comparações pareadas em uma escala proporcional (SAATY e HU, 1998). O termo escala proporcional denota escala multiplicativa que está relacionada à transitividade do método. Como exemplo, na situação em que A é duas vezes mais preferível a B, B duas vezes mais preferível a C, então A é quatro vezes mais preferível a C. O AHP é um método de decisão multicritério discreto que analisa problemas em que o conjunto de alternativas de decisão é formado por um número finito e, geralmente, pequeno de variáveis. Segundo Vaidya e Kumar (2006) o AHP é um dos métodos de decisão multicritério mais aplicados. Este método de decisão multicritério tem sido amplamente utilizado, pois permite a integração entre dados quantitativos e qualitativos, especialmente em situações em que existem importantes aspectos qualitativos que exigem reflexão em conjunto com diversos fatores mensuráveis quantitativos (NOH e LEE, 2003).

Segundo Vaidya e Kumar (2006), as principais etapas para o desenvolvimento do método AHP são as seguintes: (i) especificar o problema; (ii) ampliar os objetivos do problema ou considerar todos os intervenientes, objetivos e os seus resultados; (iii) identificar os critérios que influenciam o comportamento; (iv) estruturar o problema em uma hierarquia de diferentes níveis constituídos de meta, critérios e subcritérios e alternativas como apresentado na Figura 7; (v) comparar cada elemento no correspondente nível com base numa escala numérica. Isto exige  $n.(n-1)/2$  comparações, onde  $n$  é o número de elementos. Considerar que os elementos da diagonal principal são iguais a 1 e os outros elementos serão os recíprocos das comparações iniciais; (vi) realizar os cálculos para encontrar o máximo autovalor, o índice de consistência (CI), a razão de consistência (RC), e os valores normalizados para cada critério e alternativa (vetor de prioridades); (vii) se o máximo autovalor, CI, e RC são satisfatórios. Então, uma decisão é tomada com base nos valores normalizados. Senão o processo é repetido até que estes valores se encontram em um intervalo adequado.

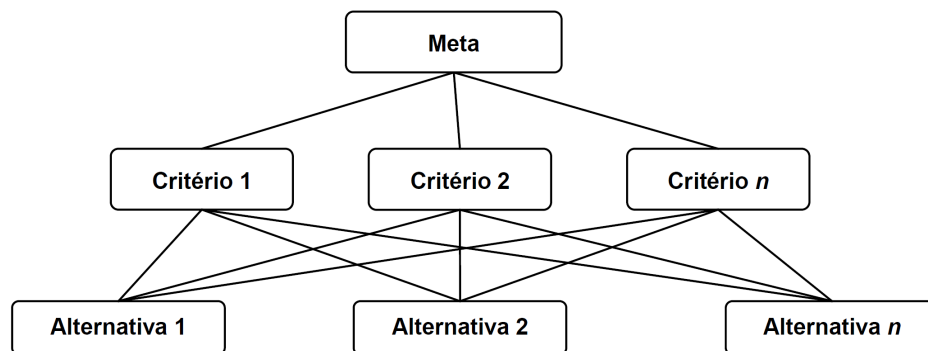


Figura 7 - Hierarquia do processo de decisão do método AHP

FONTE: Autor.

Dong *et al.* (2008) afirmam que a validade do método AHP como ferramenta de tomada de decisão está relacionada com a seleção da escala numérica para realizar as comparações e o método para determinar o vetor de prioridades. Ji e Jiang (2003) reforçam a importância da escala na aplicação do método AHP. Segundo esses autores, a escala tem um efeito significativo sobre a consistência e precisão dos resultados obtidos na análise. Em virtude disto, o tema relativo a escalas utilizadas para realizar a comparação no método AHP tem recebido muita atenção, e várias têm sido propostas na literatura. As principais escalas utilizadas no método AHP são a escala de Saaty, Ma-Zheng, Donegan-Dodd-McMaster, Lootsma ou escala geométrica e Salo-Hämäläinen ou escala balanceada (JI e JIANG, 2003).

Quase todas as escalas adotam nove graduações, como na escala de Saaty. Apenas a

escala de Lootsma utiliza nove ou sete graduações. O motivo para Saaty selecionar uma escala com nove graduações é que um indivíduo não pode comparar simultaneamente mais do que  $7 \pm 2$  objetos sem confusão. Como os valores definidos em uma escala são usados para representar a importância relativa entre dois objetos (critérios ou alternativas) comparados, uma definição semântica para as graduações é necessária para facilitar as comparações. Saaty (1977) define cinco graduações principais, como mostrado na Tabela 7, e quatro outras intermediárias, as quais se situam entre duas graduações principais adjacentes. As outras escalas adotam uma definição similar.

Tabela 7 – Semântica da escala de Saaty

Graduação	Definição	Explicação
1	Importância igual	Dois critérios ou alternativas contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	Experiência e julgamento levemente a favor de um sobre o outro
5	Importância forte	Experiência e julgamento fortemente a favor de um sobre o outro
7	Importância muito forte	Um critério ou alternativa é fortemente favorecida e sua dominância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A ordem de importância de um critério ou alternativa sobre outro é afirmada na maior ordem possível.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Usados para representar relações intermediárias entre as prioridades listadas acima.

FONTE: (Saaty 1977).

A determinação do vetor de prioridades a partir de matrizes de comparações pareadas é a parte principal do método AHP. Há diferentes métodos para extrair o vetor de prioridades a partir de matrizes de comparação (SRDJEVIC, 2005). Um dos métodos mais conhecidos e aplicados é o método do autovetor principal proposto por Saaty (1977). Muitos outros métodos de priorização foram propostos como o método de normalização aditiva, método dos mínimos quadrados ponderados, método dos mínimos quadrados logarítmicos, método dos mínimos valores absolutos logarítmicos, método de programação por metas logarítmico, método de programação por preferência difusa (SRDJEVIC, 2005). Em seu trabalho, Wang *et al.* (2008) apresentam uma revisão com mais de vinte métodos diferentes para obter vetores de priorização e propõem um novo método. Apesar do grande número de métodos, o maior esforço dos pesquisadores, neste assunto, têm sido direcionado para encontrar o melhor método para determinar o vetor de prioridades. Os trabalhos de Kumar e Ganesh (1996), Saaty e Hu (1998), Srdjevic (2005) e Wang *et al.* (2008) apresentam análises de diferentes métodos de priorização, empregados a diferentes problemas de decisão multicritério.

A avaliação da consistência dos vetores de prioridades é realizada com base em índices de consistência que medem a inconsistência das respostas segundo a regra da transitividade. Existem diferentes índices de consistência como os de Monsuur (1996), Peláez e Lamata (2003) e Stein e Mizzi (2007). O índice de consistência proposto por Saaty (1980), o qual é apresentado na equação (1), é o mais empregado.

$$IC = (\lambda_{\text{máx}} - n)/(n - 1) \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$\lambda_{\text{máx}}$  = é o máximo autovalor da matriz recíproca;

$n$  = número de elementos da matriz recíproca.

O valor de  $IC \geq 0$ , e  $IC = 0$  se (e somente se) a matriz é consistente.

Como o índice de consistência ou a inconsistência das respostas tende a aumentar com o tamanho da matriz, Saaty (1980) sugeriu um método para tentar remover a dependência de  $n$ , com a utilização de matrizes aleatórias. A média dos valores de IC destas matrizes aleatórias para cada  $n$  é chamado de índice de consistência aleatório (RI). O Quadro 1 apresenta os valores de RI.

Quadro 1 - Valores do índice RI para diferentes tamanhos de matrizes

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25
RI	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404	1,452	1,484	1,583	1,630	1,654

FONTE: Stein e Mizzi (2007).

Ao se dividir o valor de IC de um problema pelo valor adequado de RI obtêm-se a razão de consistência (RC). Este índice é que, efetivamente, é utilizado para validar um vetor de prioridades. Inicialmente, Saaty (1980) considerou o valor de RC inferior a 0,1 como satisfatório para a razão de consistência, mas em uma revisão posterior de seu trabalho, Saaty (1994) estabeleceu novos valores para o índice RC, os quais estão associados ao tamanho da matriz utilizada. Estes valores são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de RC em função do tamanho da matriz

RC	Tamanho da Matriz
0,05	Matriz 3 x 3
0,08	Matriz 4 x 4
0,10	Matrizes de ordem superior

FONTE: Saaty (1994).

Caso o valor do índice RC para a matriz em análise for superior ao apresentado na Tabela 8, os julgamentos pareados devem ser revisados para que a inconsistência seja minimizada.

Outro índice utilizado na avaliação da consistência de vetores de prioridades, obtidos pelo método de normalização aditiva, é o índice de consistência harmônico (ICH) proposto por Stein e Mizzi (2007). Segundo estes autores, o ICH é recomendado como medida de consistência quando se utiliza o método de normalização aditiva devido à conexão natural existente, pois ambos são obtidos a partir da soma das colunas da matriz de comparações. O ICH é apresentado na equação (2).

$$ICH = \frac{[(MH_s - n) \cdot (n + 1)]}{n \cdot (n + 1)} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

$ICH$  = é o índice de consistência harmônico;

$MH_{(s)}$  = é a média harmônica da soma das colunas da matriz recíproca;

$n$  = número de elementos da matriz recíproca.

O valor de  $ICH \geq 0$ , e  $ICH = 0$  se (e somente se) a matriz é completamente consistente.

Como o índice de consistência harmônico tende a aumentar com o tamanho da matriz, Stein e Mizzi (2007) adotaram método proposto por Saaty (1980) para tentar remover a dependência de  $n$ , com a utilização de matrizes aleatórias. A média dos valores de ICH destas matrizes aleatórias para cada  $n$ , é chamado de índice de consistência aleatório harmônico (HRI). O Quadro 2 apresenta os valores de HRI.

Quadro 2 - Valores do índice HRI para diferentes tamanhos de matrizes

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25
HRI	0,550	0,859	1,061	1,205	1,310	1,381	1,437	1,484	1,599	1,650	1,675

FONTE: Stein e Mizzi (2007).

A razão de consistência (RC) é obtida pela equação (3), dividindo-se o valor de ICH pelo

valor adequado de HRI. O RC é o índice utilizado para validar a consistência do preenchimento da matriz para estabelecer o vetor de prioridades.

$$IC = ICH/HRI \quad \text{Equação (3)}$$

Na utilização do índice de consistência harmônico, Stein e Mizzi (2007) consideram os valores de RC propostos por Saaty (1994) apresentados na Tabela 8.

O resultado final do método AHP é obtido com a determinação do *ranking* das alternativas em relação aos critérios estabelecidos para o problema. A seqüência de ações para aplicação do método consiste na construção da matriz de prioridade dos critérios, que é uma matriz quadrada  $n \times n$ , em que  $n$  representa o número de critérios a serem utilizados na análise. Preenche-se a matriz comparando-se os critérios que aparecem na coluna da esquerda em relação aos critérios que aparecem na linha superior, com base em uma escala de comparação como as discutidas anteriormente. O mesmo procedimento é realizado para as matrizes de alternativas, ou seja, são construídas matrizes quadradas,  $n \times n$ , onde  $n$  representa o número de alternativas. Neste caso, as alternativas são comparadas entre si em uma matriz considerando cada um dos critérios separadamente, de modo que número de matrizes de alternativas será igual ao número de critérios avaliados.

Após a realização dos julgamentos pareados e o preenchimento das matrizes de prioridade dos critérios e das alternativas em relação a cada critério, realiza-se a determinação do vetor de prioridades para cada matriz com base em um método apropriado, como autovetor principal, normalização aditiva, método dos mínimos quadrados logarítmicos entre outros.

Com os vetores de prioridades determinados, deve-se verificar a razão de consistência (RC) da análise. Caso se encontre conforme os valores estabelecidos na Tabela 8, pode-se determinar o *ranking* global das alternativas. Do contrário, é necessário rever os julgamentos da matriz para obterem-se valores adequados de consistência.

O *ranking* global das alternativas é calculado com base na equação (4).

$$R_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot a_{ij} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$R_i$  = o *ranking* global da alternativa  $i$  em relação ao critério  $j$ ;

$w_j$  = peso do critério  $j$ ;

$a_{ij}$  = desempenho da alternativa  $i$  em relação ao critério  $j$ .

Na seleção de processos de fabricação, a utilização do método AHP apresenta as seguintes abordagens: (i) ferramenta principal do processo de seleção, como no trabalho de Ravisankar *et al.* (2006); (ii) ferramenta auxiliar, como nos trabalhos de Akarte *et al.* (1999), Chougule e Ravi (2003; 2005) e Nagahanumaiah *et al.* (2008).

No trabalho de Ravisankar *et al.* (2006), o método AHP foi utilizado na seleção de processos de soldagem. O objetivo era selecionar entre três processos de soldagem, TIG, MIG/MAG e arco plasma, o mais adequado para soldar juntas de uma liga de alumínio de alta resistência, A 7075. Foram utilizados dez critérios para avaliação dos processos: preparação inicial requerida, disponibilidade de consumíveis, habilidade do soldador, procedimentos de soldagem, qualidade da solda, fadiga do operador, limpeza após soldagem, facilidade de automação, posições de soldagem possíveis, custo da soldagem. O custo da soldagem foi determinado pelo método do custo baseado por atividade (ABC). Segundo estes autores, a seleção de processos é um importante problema de Engenharia, especialmente quando muitos dos fatores são intangíveis, pois o método AHP possibilita quantificar os fatores intangíveis de maneira mais elaborada. Outra conclusão destes autores é que a utilização de uma metodologia de seleção baseada no método AHP fornece como vantagens uma interface de pronta acessibilidade ao usuário, como resultado da especificação de vários atributos, uma necessidade mínima de dados e uma transferência de informações mais direta.

No trabalho de Akarte *et al.* (1999), a seleção de processos de fundição de metais foi o objetivo do estudo. O método AHP foi utilizado como ferramenta auxiliar, com a finalidade de atribuir peso aos dezenove critérios utilizados no processo de seleção. A outra ferramenta utilizada no processo de seleção foi a lógica difusa, na qual a compatibilidade dos requisitos técnicos do componente era avaliada em relação a cinco processos de fundição por meio de funções triangulares e trapezoidais de lógica difusa. Pela combinação do peso do critério com sua respectiva compatibilidade com o processo, os autores definiram um índice de compatibilidade do componente com o mesmo.

No trabalho de Nagahanumaiah *et al.* (2008), uma metodologia para seleção de processos de prototipagem rápida para confecção de ferramental, avaliação de manufacturabilidade e estimação de custos de moldes para injeção de plásticos assistida por computador, foi apresentada. O método AHP em combinação com o QFD foi utilizado na primeira etapa da metodologia, seleção de processos de prototipagem rápida para confecção de ferramental para injeção de plásticos. A função do método AHP, nesta etapa, foi determinar a importância relativa dos requisitos do ferramental solicitados pelo cliente. Na



hierarquia de avaliação, os requisitos do ferramental foram divididos em dois níveis, na primeira com os requisitos de material, aspectos geométricos, material do molde e quantidade a ser produzida e na segunda, com os requisitos de mínimo custo, boa precisão, pequeno *lead time*, bom acabamento, alta resistência e alta flexibilidade. A seleção do processo de prototipagem rápida foi realizada pelo método QFD, a partir dos requisitos priorizados pelo método AHP.

#### 2.4.3 Modelamento Técnico de Custo

Existem diferentes métodos para determinar o custo de fabricação. Martin *et al.* (2007) apresentam uma classificação das formas de apuração dos custos de fabricação. A Tabela 9 apresenta os principais métodos de apuração de custos.

Tabela 9 – Métodos de avaliação de custos e sua imprecisão

<b>Método</b>	<b>Descrição</b>	<b>Imprecisão</b>
Intuitivo	Avaliação do custo em relação ao conhecimento pessoal e intuição.	30% a 50%
Comparação	Avaliação utilizando componentes similares.	30% a 50%
Analógico	Avaliação baseada em casos, definição dos principais parâmetros para comparação com casos prévios.	14% a 30%
Paramétrico	Um ou muitos parâmetros são escolhidos como críticos. Eles são usados com coeficientes para avaliar o custo.	14% a 30%
Analítico	Custos diretos e indiretos são considerados. Cada custo é calculado e então eles são todos somados para se obter o custo do produto.	5% a 15%

FONTE: Martin *et al.* (2007).

Um método analítico para determinar custos de fabricação é o modelamento técnico de custo (MTC) proposto por Szekely *et al.* (1996) descreve a união de modelos de custo com modelos técnicos. No MTC, algoritmos que descrevem os aspectos técnicos do processo são utilizados para prever valores tais como tempo de ciclo, necessidade de energia e consumo de material. Estes parâmetros, por sua vez, são diretamente relacionados ao custo de materiais, energia e mão de obra, associados ao processo. Deste modo, as entradas neste modelo podem incluir temperaturas, pressões, comprimentos, áreas, enquanto que as saídas incluem preço de equipamentos, custos de peças, contabilizando totalmente os custos indiretos. Com esta abordagem de modelamento, o custo de processos pouco entendidos pode ser estimado com uma certa precisão e, estratégias para o desenvolvimento de tecnologias acertadas para otimizar o processo podem ser concebidas. Em seu trabalho, Szekely *et al.* (1996) apresentaram como exemplo de aplicação de seu modelo, o estudo do processo de

fundição de rodas de alumínio. O processo de fundição sob pressão foi o escolhido para análise. Pela combinação do modelamento físico do processo de fundição com um modelo descritivo de custo, os autores estabeleceram como variável técnica de controle de custo, a pressão aplicada para se produzirem as rodas. A Figura 8 apresenta o gráfico da evolução dos custos de fabricação da roda em relação à pressão aplicada no processo.

A faixa de pressão avaliada foi de 100-500 atm. Com aumento da pressão, a porosidade é reduzida e o rendimento metalúrgico aumentado. Com altas pressões, o custo aumenta devido ao investimento de capital necessário ao equipamento, a pressão ótima de trabalho, a que resulta em menor custo, é de 300 atm.

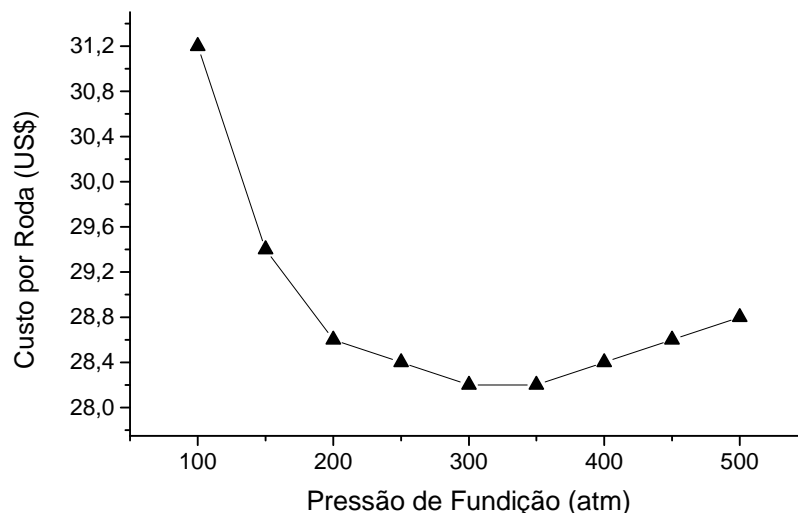


Figura 8 – Custo versus pressão de fundição como obtido pelo MTC para fundição de rodas de alumínio

FONTE: Szekely *et al.* (1996).

Na determinação dos custos de fabricação de componentes fundidos, os autores Creese *et al.* (1992), Ravi (2005), Chougule e Ravi (2006) e Stoll (2009) apresentam modelos de custos baseados nos princípios do modelamento técnico de custo, os quais consideram as especificidades dos processos de fundição de metais. Por estes modelos apresentarem muitas similaridades, apenas o modelo de custo proposto por Ravi (2005) é detalhado. Este modelo considera o custo do material direto, o custo da confecção do molde e os custos de conversão, como energia e mão de obra. Apesar desse modelo de custo ser destinado a processos de molde dispensável, pode ser ajustado para processos de molde permanente, pela supressão da parcela do custo de confecção do molde. As equações do modelo são apresentadas a seguir.

Os custos de material incluem custos diretos e indiretos. O metal ou liga fundida que aparece no produto constitui o custo direto de material, que pode ser determinado com base no peso do fundido. Contudo, a quantidade de metal consumida é maior devido a perdas irre recuperáveis durante a fusão, vazamento e rebarbação. O custo direto de material é obtido com base na equação (5).

$$C_{metal} = c_{ml} \cdot pl \cdot f_m \cdot f_p \cdot f_f \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

$C_{metal}$  = custo de material direto em R\$;

$c_{ml}$  = custo por unidade de peso do metal ou liga em R\$/kg;

$pl$  = peso líquido do componente fundido em kg;

$f_m$  = fator de perda na fusão de 1,01-1,10;

$f_p$  = Fator de perda no vazamento de 1,01-1,07;

$f_f$  = Fator de perda no acabamento final 1,01-1,07.

O fator de perda na fusão depende do tipo de forno empregado e pode atingir os valores de 1,10 para forno cubilô e 1,01 para forno de indução.

Materiais indiretos são essenciais para a produção, mas não estão incluídos no produto. A areia de moldagem, machos e a alimentação adicionada constituem os materiais indiretos. O custo da areia de moldagem depende do tipo de areia empregada (sílica, olivina, zirconita), da composição (quantidade de ligante) e do tamanho do molde. O custo da areia de macharia depende do tipo de processo de macharia utilizado e do volume dos machos. Os modificadores de custo como rejeição de moldes, machos e componentes e a recuperação da areia devem ser considerados. O custo da areia de moldagem e de macharia é determinado com base nas equações (6) e (7).

$$C_{Molde} = c_{ms} \cdot pm \cdot f_{cm} \cdot f_{rm} / n_{cav} \quad \text{Equação (6)}$$

$$C_{Macho} = c_{cs} \cdot pc \cdot f_{cc} \cdot f_{rc} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

$C_{Molde}$  = custo do molde em R\$;

$C_{Macho}$  = custo do macho (núcleo de areia) em R\$;

$n_{cav}$  = número de cavidades por molde;  
 $c_{ms}$  = custo da areia de moldagem por unidade de peso (R\$/kg);  
 $c_{cs}$  = custo da areia de macharia por unidade de peso (R\$/kg);  
 $pm$  = peso de areia do molde em kg;  
 $pc$  = peso de areia do macho em kg;  
 $f_{cm}$  = fator de reciclagem da areia de moldagem de 0,01-1,00;  
 $f_{cc}$  = fator de reciclagem da areia de macharia de 0,01-1,00;  
 $f_{rm}$  = fator de rejeição de moldes de 1,01-1,10;  
 $f_{rc}$  = fator de rejeição de machos de 1,01-1,10.

O fator de reciclagem de areia indica a quantidade de areia nova necessária para a confecção de cada molde ou macho. Um fator baixo como 0,01 indica que 99% da areia é reciclada e um fator de 1 indica que, na confecção de um molde ou macho, utiliza-se apenas areia nova. O fator de rejeição é incluído para considerar as quebras e perdas de moldes e machos; um valor de 1 indica zero de perdas. Os custos de outros materiais indiretos como filtros, luvas, chapelins e resfriadores devem ser incluídos se estes elementos forem utilizados.

Na estimação do custo de conversão Ravi (2005), considera apenas o custo da energia necessária à fusão e o custo da mão de obra envolvida na produção dos componentes. O custo da energia necessária à fusão e ao superaquecimento do metal até a temperatura de vazamento podem ser calculados usando uma equação termodinâmica. Na prática mais energia é consumida devido à eficiência do forno e ao rendimento metalúrgico. A equação (8) apresenta este cálculo.

$$C_{FM} = c_e \cdot (pl/Y) \cdot [L + C_{ps} \cdot (T_P - T_S) + C_{pa} \cdot (T_S - T_A)] \cdot f_\eta \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

$C_{FM}$  = custo da fusão do metal em R\$;  
 $c_e$  = custo por unidade de energia em R\$/kwh;  
 $pl$  = peso líquido do componente fundido em kg;  
 $Y$  = rendimento metalúrgico do componente;  
 $L$  = calor latente de fusão do metal;  
 $C_{ps}$  = calor específico do metal fundido até a temperatura de *solidus*;  
 $C_{pa}$  = calor específico do metal fundido até a temperatura ambiente;  
 $T_P$  = temperatura de vazamento do metal;

$T_S$  = temperatura de *solidus* do metal;

$T_A$  = temperatura ambiente;

$f_\eta$  = fator de eficiência do forno, 1,4-1,8 para forno de indução.

Outras atividades de consumo intensivo de energia envolvem as etapas de preparação do molde, limpeza e acabamento final. Estes custos podem ser atribuídos com base no peso. Uma taxa pode ser estabelecida baseada na divisão dos custos de energia destas atividades pela produção em peso de componentes para um determinado tempo.

Os custos de mão de obra dependem dos equipamentos disponíveis e do tempo necessário à execução das várias atividades na produção. Algumas atividades como fusão, preparação de areia e desmoldagem são realizadas em bateladas, nas quais é possível calcular o tempo médio por componente. O custo da mão de obra é determinado com base na equação (9).

$$C_{MOD} = c_{op} \cdot n_{op} \cdot \tau / \eta \cdot n_c \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

$C_{MOD}$  = custo da mão de obra em R\$;

$n_{op}$  = número de operadores envolvidos na atividade;

$c_{op}$  = custo da unidade de mão de obra por operador e por unidade de tempo;

$\tau$  = tempo necessário para atividade *i* por componente;

$\eta$  = eficiência do operador;

$n_c$  = número de componentes manuseados na atividade.

### 3 MÉTODO MULTICRITERIAL PARA SELEÇÃO DE PROCESSOS DE FUNDIÇÃO DE METAIS

Neste capítulo, apresenta-se a elaboração do Método Multicriterial para Seleção de Processos de Fundição de metais (MMSPF) que contempla os módulos de seleção técnica e econômica. A seção 3.1 apresenta o escopo de aplicação do método e sua estrutura. Nas seções seguintes, os módulos de seleção técnica (seção 3.2) e econômica (seção 3.3) são descritos.

#### 3.1 ESCOPO DE APLICAÇÃO E ESTRUTURA DO MÉTODO

A seleção do processo mais adequado para fabricar um componente é uma importante tarefa do desenvolvimento de novos produtos. Com a finalidade de auxiliar na tarefa de seleção do processo de fundição de metais mais adequado para se produzir um componente mecânico, esta tese propõe um método denominado Método Multicriterial para Seleção de Processos de Fundição (MMSPF). A Figura 9 apresenta o escopo das atividades desenvolvidas pelo MMSPF no âmbito da seleção de processos de fabricação que ocorre nas diferentes fases do desenvolvimento de novos componentes.

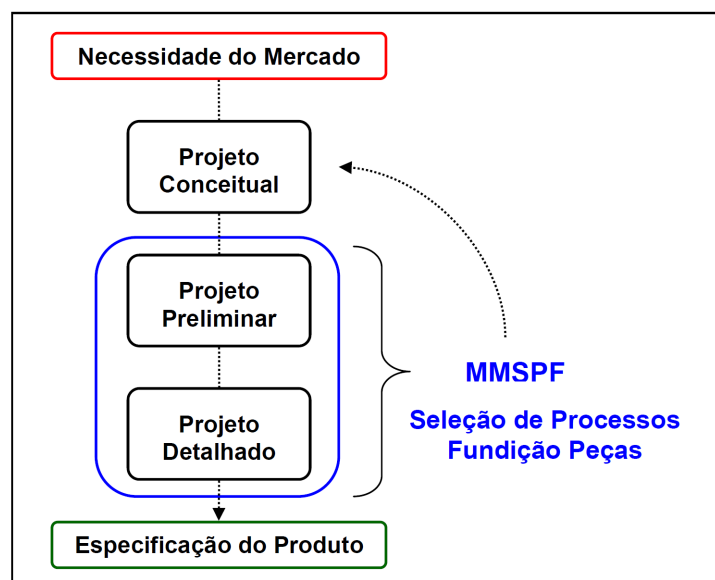


Figura 9 – Escopo das atividades desenvolvidas pelo MMSPF no âmbito de seleção de processos que ocorre nas fases de desenvolvimento de novos componentes

FONTE: Aautor.

Com base nas considerações relatadas na seção 2.2.5, a seleção de processos no desenvolvimento de produtos deve ser realizada o mais cedo possível para que os melhores resultados de redução de custos e de tempo de desenvolvimento sejam obtidos. Deste modo, o MMSPF tem o propósito de antecipar as atividades de seleção de processos de fabricação necessárias no projeto preliminar e no projeto detalhado, permitindo a sua execução nos estágios iniciais do desenvolvimento, ou seja, no projeto conceitual.

Em termos de processos de fabricação, o escopo de aplicação do MMSPF contempla processos de fundição de metais destinados a produção de peças, em que estas são produzidas com forma próxima da final (*near net shape*), ou com forma final (*net shape*). A seleção do material utilizado para produzir o componente não é escopo do MMSPF.

O MMSPF é destinado a empresas que utilizem componentes fundidos com forma próxima da final (*near net shape*), ou com forma final (*net shape*), deste modo, o MMSPF pode ser utilizado em empresas de pequeno, médio e grande porte como ferramenta para realizar a seleção de processos de fundição de metais.

A estrutura do MMSPF, seus módulos e etapas operacionais são apresentados na Figura 10.

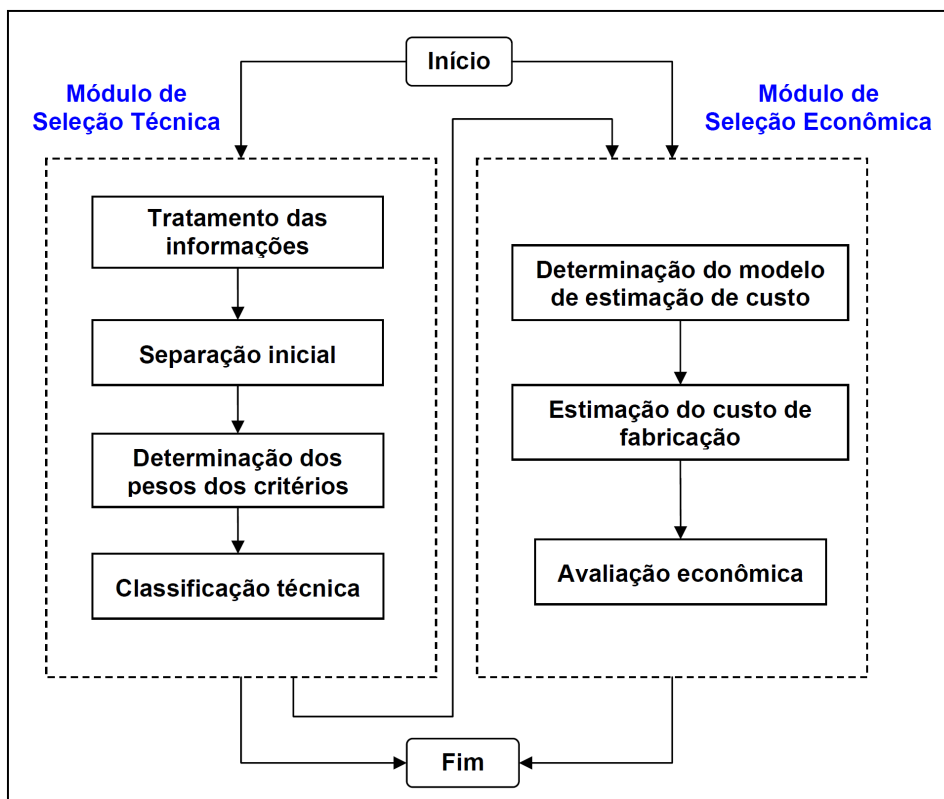


Figura 10 – Módulos e etapas operacionais do MMSPF

FONTE: Autor.

O Método Multicriterial para Seleção de Processos de Fundição (MMSPF) é constituído pelos módulos de seleção técnica e econômica. O módulo de seleção técnica é destinado a antecipar as atividades de seleção de processos a serem desenvolvidas na fase de projeto preliminar, enquanto o módulo de seleção econômica é destinado a antecipar as atividades de seleção de processos necessárias à fase de projeto detalhado.

A estrutura do método apresentada na Figura 10 é baseada em uma sequência de etapas operacionais destinadas a separar, classificar e avaliar processos de fundição de metais. Estas atividades desenvolvidas pelo método são baseadas nas diretrizes propostas por Lovatt e Shercliff (1998) e Ashby *et al.* (2004), que afirmam que a seleção de processos deve ocorrer de forma sequencial, inicialmente avaliando aspectos técnicos e, posteriormente, considerando aspectos econômicos.

A análise dos métodos de seleção de processos de fundição de metais, realizada na seção 2.3.9, foi responsável pelas principais diretrizes operacionais apresentadas no MMSPF. Os aspectos positivos dos métodos existentes na literatura mantidos na elaboração do MMSPF são: (i) critérios de seleção, os quais estão bem identificados e envolvem aspectos de projeto, qualidade e de produção; (ii) apresentação das informações utilizadas nos métodos de seleção na forma de funções de pertinência e variáveis linguísticas.

Inovações propostas pelo MMSPF, não contempladas nos métodos existentes na literatura, são: (i) consolidação das diferentes fontes de informação dos processos a serem utilizadas no MMSPF por meio de uma função de agregação; (ii) utilização de aspectos ambientais como critérios para seleção de processos de fundição de metais; (iii) utilização de estimação dos custos de fabricação, para desenvolver uma estratégia de seleção baseada em avaliação econômica.

Inicialmente, no módulo de seleção técnica, os principais processos de fundição de metais são avaliados para verificar aqueles capazes de atender aos requisitos do componente em análise. Nesta etapa, as especificações do componente, tais como, material e principalmente características dimensionais são testadas em relação à exequibilidade de fabricação, pelos processos de fundição de metais contemplados no MMSPF. Os processos considerados capazes são classificados em relação a um conjunto de critérios, sendo os pesos de cada critério determinados pelo decisor. Caso mais de um processo apresente compatibilidade técnica, a escolha do mais adequado para produção do componente é realizada pelo módulo de seleção econômica.

Como ferramenta auxiliar no desenvolvimento de componentes fundidos, o módulo de seleção técnica tem como objetivos principais: (i) promover a verificação dos requisitos do



componente em relação à forma; *(ii)* dar suporte à inovação, por meio de um método estruturado de seleção, que analisa os principais processos de fundição de metais, indicando os mais adequados, como opções para fabricação do componente em análise.

No módulo de seleção econômica, os processos de fundição de metais, classificados no módulo de seleção técnica, são avaliados para verificar o mais viável economicamente para produzir o componente em análise. O principal elemento deste módulo é a estimação de custos de fabricação do componente fundido nos diferentes processos de fundição de metais em avaliação, por meio de um modelo de estimação de custos de fabricação que considera características técnicas dos processos. A avaliação econômica é realizada com base em um índice de mérito, que pondera o custo de fabricação estimado em relação à classificação técnica, apresentada pelo processo de fundição. Deste modo, o melhor processo é aquele que possui o menor índice, ou seja, menor custo de fabricação com desempenho técnico adequado.

A seguir, são descritas as etapas operacionais que compõem os módulos de seleção técnica e econômica.

### 3.2 MÓDULO DE SELEÇÃO TÉCNICA

Inicialmente, é apresentada descrição das informações utilizadas no módulo de seleção técnica e, posteriormente, as suas etapas operacionais, constituídas por: *(i)* tratamento das informações, *(ii)* separação inicial, *(iii)* determinação dos pesos dos critérios e *(iv)* classificação técnica.

#### 3.2.1 Informações Utilizadas no Módulo de Seleção Técnica

O módulo de seleção técnica utiliza informações do componente em análise. Estas são denominadas de requisitos do componente e as informações dos principais processos de fundição de metais utilizados, como conjunto solução do processo de seleção, constituindo a base de dados de processos.

##### 3.2.1.1 Requisitos do componente

O módulo de seleção técnica contempla os requisitos associados ao material, projeto e qualidade do componente a ser produzido. A Tabela 10 apresenta os requisitos do

componente, utilizados como informações de entrada das etapas operacionais do módulo de seleção técnica.

Tabela 10 – Requisitos do componente em análise utilizados no módulo de seleção técnica

<b>Separação Inicial</b>	<b>Classificação Técnica</b>
Ângulo de extração mínimo	Complexidade de forma
Maior dimensão	Tamanho de lote anual
Maior espessura de seção	Tolerância dimensional
Tipo de liga	<i>Lead time</i>
Menor espessura de seção	
Rugosidade superficial máxima	
Peso	

FONTE: Autor.

### 3.2.1.2 Informações dos processos de fundição de metais

Os processos de fundição de metais destinados à produção de peças contemplados no MMSPF, são os de molde dispensável e de molde permanente. Segundo Jorstad (2008), os processos que utilizam areia na confecção dos moldes (molde dispensável) juntamente com os processos de fundição sobre pressão (molde metálico permanente) respondem por 94% da produção de componentes fundidos. Esta dominância se deve ao fato de que estes processos são responsáveis pela produção dos ferros fundidos cinzento e nodular (areia) e das ligas de alumínio (fundição sob pressão), sendo que estes metais correspondem a 83% do total de peças fundidas, produzidas no mundo em 2008 (*MODERN CASTING*, 2009). Em relação ao tipo de liga, são contemplados no MMSPF ligas ferrosas, tais como, ferro fundido cinzento e nodular (FF), aços para fundição (AF) e ligas não ferrosas específicas para fundição de alumínio (LA), cobre (LC), magnésio (LM) e zinco (LZ). O Quadro 3 apresenta os processos de fundição e as ligas que podem ser processados por estes processos.

Quadro 3 - Processos de fundição de metais contemplados no MMSPF e respectivas ligas processadas

<b>Processo de Fundição de Metal</b>		<b>AF</b>	<b>FF</b>	<b>LA</b>	<b>LC</b>	<b>LM</b>	<b>LZ</b>
<b>P1</b>	Areia verde – manual						NR <sup>1</sup>
<b>P2</b>	Areia verde – mecanizada						NR <sup>1</sup>
<b>P3</b>	Areia verde – automatizada						NR <sup>1</sup>
<b>P4</b>	Areia silicato - CO <sub>2</sub>						
<b>P5</b>	Areia com resina – cura frio						
<b>P6</b>	Areia com resina – <i>shell molding</i>					NR <sup>1</sup>	NR <sup>1</sup>
<b>P7</b>	Processo molde de gesso – <i>plaster molding</i>	NR <sup>2</sup>	NR <sup>2</sup>				
<b>P8</b>	Processo molde cerâmico						
<b>P9</b>	<i>Investment casting</i>						

Continua

Quadro 3 - conclusão

Processo de Fundição de Metal		AF	FF	LA	LC	LM	LZ
P10	Molde cheio - <i>lost foam</i>	NR <sup>3</sup>					
P11	Fundição centrífuga - molde metálico	NR <sup>4</sup>	NR <sup>4</sup>				
P12	Molde permanente - gravidade	NR <sup>4</sup>					
P13	Molde permanente - baixa pressão	NR <sup>4</sup>	NR <sup>4</sup>				
P14	Fundição sob pressão - <i>die casting</i>	NR <sup>4</sup>	NR <sup>4</sup>				
P15	<i>Squeeze casting</i>	NR <sup>4</sup>	NR <sup>4</sup>				

FONTE: Autor.

LEGENDA: NR – Não utilizado normalmente de acordo com: (1) Swift e Booker (2003); (2) Boljanovic (2009); (3) Brown (2000); (4) Ligas não recomendadas para estes processos no MMSPF. A discussão a respeito deste assunto é apresentada em 5.2.1.

Como o módulo de seleção técnica do MMSPF é destinado aos estágios iniciais do desenvolvimento do componente, não se determina uma liga específica. Essa estratégia permite selecionar o processo de fundição e, depois dessa etapa, realizar a seleção da liga adequada ao processo escolhido, e que atenda aos requisitos mecânicos do componente em análise, considerando-se o custo de fabricação no módulo de seleção econômica.

As informações dos processos de fundição utilizadas no MMSPF podem ser quantitativas ou qualitativas. Informações quantitativas de processos de fabricação não são absolutas, e incluem sempre uma imprecisão em relação às faixas das capacidades (JORSTAD, 2008). Em função da dificuldade de se apresentarem valores absolutos para as capacidades de um processo, Ravi (2005) indica que as capacidades dos processos podem ser descritas em faixas. Com base nesta abordagem, podem ser definidos quatro pontos básicos das capacidades de um processo em relação a determinada característica: um valor mínimo absoluto ( $a$ ), um valor mínimo normalmente obtido pelo processo ( $b$ ), um valor máximo normalmente obtido pelo processo ( $c$ ) e um valor máximo absoluto ( $d$ ). Esses limites podem ser adequadamente convertidos em funções de pertinência trapezoidais  $Trap(a, b, c, d, \mu(x))$ , conforme apresentado na Figura 11.

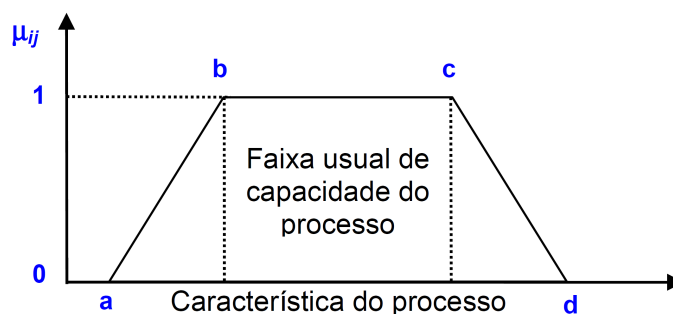


Figura 11 - Capacidade do processo na forma de função de pertinência

FONTE: Autor.

As funções de pertinência trapezoidais são o formato adotado na representação de dados quantitativos de processos de fundição de metais na base de dados do MMSPF.

Muitas informações de processos de fundição de metais são apresentadas na forma de variáveis linguísticas. A utilização destas informações qualitativas contribui para ampliar a base de dados do MMSPF. Para permitir o tratamento nas etapas operacionais do MMSPF, as informações qualitativas, na forma de variáveis linguísticas, são associadas a valores numéricos, na forma de funções de pertinência. Este procedimento de associar variáveis linguísticas a valores numéricos foi empregado por outros métodos de decisão multicritério, tais como em Cheng *et al.* (1999) e Tai e Chen (2009).

Segundo Herrera e Herrera-Viedma (2000), uma alternativa para reduzir a complexidade da definição de uma variável linguística é apresentar um conjunto de variáveis linguísticas distribuídas em uma escala ordenada. Os dados na forma de variáveis linguísticas utilizados na base de dados são compostos por dois conjuntos, ordenados em ordem crescente em relação à característica de interesse. Um, com cinco variáveis linguísticas {muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto} e o outro, formado por sete variáveis {nenhum, muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, perfeito}. A Figura 12 apresenta os conjuntos com os respectivos valores de  $\mu(x)$ .

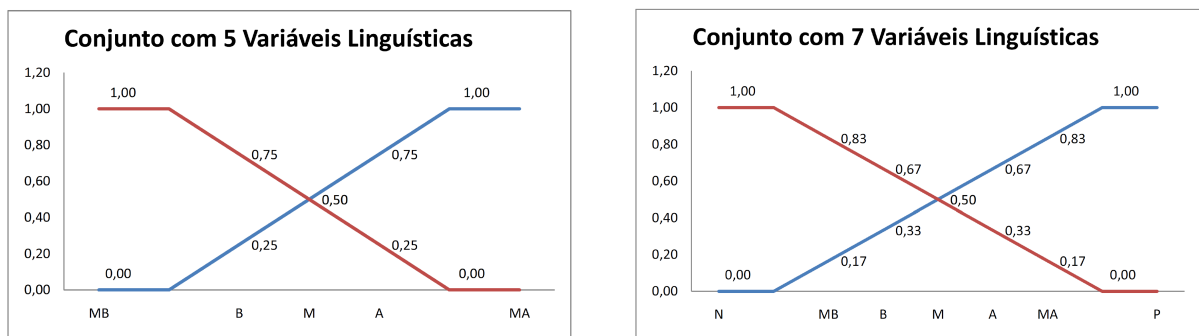


Figura 12 – Valores atribuídos às variáveis linguísticas utilizadas no MMSPF

FONTE: Autor.

### 3.2.2 Tratamento das Informações da Base de Dados

A quantidade de dados existentes a respeito de processos de fundição de metais é bastante ampla, o que torna difícil a escolha de quais informações serão utilizadas na aplicação do MMSPF. Uma das iniciativas diferenciais do MMSPF, em relação aos demais métodos de seleção de processos de fundição de metais existentes na literatura, é desenvolver uma etapa destinada ao tratamento das informações, utilizadas no desenvolvimento das etapas operacionais do método.

A solução proposta nesta etapa é fazer uso de todas as informações disponíveis e realizar um procedimento de agregação para obter um dado único, resultante de todas as bases de dados. Segundo Torra e Narukawa (2007), este procedimento é denominado de fusão de informações, realizado por meio de funções matemáticas, algoritmos, métodos ou procedimentos para combinar dados. Como todas as informações da base de dados de processos, usadas no módulo de seleção técnica, encontram-se na forma de resultados de funções de pertinência  $\mu(x)$ , propõe-se utilizar uma função de agregação de dados *fuzzy* para que todas as informações disponíveis sejam empregadas. A função de agregação proposta por Kaymac e Lemke (1998), apresentada na equação (10), é a função de agregação utilizada no tratamento das informações do MMSPF.

$$\mu_{ij} = \left\{ \sum_{k=1}^l \gamma \cdot \mu(x)_{ijk}^{\rho} \right\}^{1/\rho}, \rho > 0 \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

$\mu_{ij}$  = é o valor da característica analisada a ser utilizado nas etapas de separação inicial e classificação técnica do MMSPF;

$\gamma$  = é a importância relativa atribuída a base de dados  $k$ ;

$\mu(x)_{ijk}$  = é o valor da função de pertinência da característica analisada para o processo  $i$  em relação ao critério  $j$  na base de dados  $k$ ;

$\rho$  = é o parâmetro utilizado pelo decisor em relação ao tratamento das informações da base de dados.

A equação (10) permite que um grande número de informações provenientes de diferentes fontes, como *handbooks*, catálogos técnicos e dados de processos fornecidos por empresas de fundição, possam ser tratados e agregados em uma única informação a ser empregada no MMSPF.

### 3.2.3 Separação Inicial

A finalidade da etapa de separação inicial é eliminar os processos de fundição de metais que não atendam aos requisitos básicos do componente em análise. Os critérios utilizados nesta etapa operacional são apresentados na Tabela 11, assim como outros métodos de seleção de processos de fundição de metais que empregaram estes critérios.

Tabela 11 – Critérios utilizados na separação inicial

<b>Critérios de separação inicial</b>	<b>Métodos que utilizam estes critérios</b>
C1 Ângulo mínimo de extração	Karthik <i>et al.</i> (2003).
C2 Maior dimensão	Er <i>et al.</i> (1996); Akarte <i>et al.</i> (1999); Er e Dias (2000).
C3 Maior espessura de seção	Er <i>et al.</i> (1996); Akarte <i>et al.</i> (1999);
C4 Material	Er <i>et al.</i> (1996); Akarte <i>et al.</i> (1999); Karthik <i>et al.</i> (2003); Daws <i>et al.</i> (2008).
C5 Rugosidade superficial	Er <i>et al.</i> (1996); Akarte <i>et al.</i> (1999); Karthik <i>et al.</i> (2003); Daws <i>et al.</i> (2008).
C6 Menor espessura de seção	Er <i>et al.</i> (1996); Akarte <i>et al.</i> (1999); Karthik <i>et al.</i> (2003); Daws <i>et al.</i> (2008).
C7 Peso	Er <i>et al.</i> (1996); Akarte <i>et al.</i> (1999); Karthik <i>et al.</i> (2003); Daws <i>et al.</i> (2008).

FONTE: Autor.

Os sete critérios, listados na Tabela 11, são característicos de cada processo de fundição de metais destinados à produção de peças, e portanto, podem ser usados para determinar a exclusão daqueles que não atendam aos requisitos do componente em análise.

Nesta etapa, os critérios não possuem pesos, pois o objetivo principal é discriminar processos não capazes em relação aos requisitos do componente. Pode-se empregar apenas as informações disponíveis, ou seja, não é necessário inserir todas as informações referentes aos sete critérios para realizar a separação inicial. Porém, com a utilização de todos os critérios, a separação dos processos não capazes é mais precisa.

A etapa de separação inicial usa as informações processadas na etapa de tratamento da informação. Um processo de fundição de metal que não atenda a um dos critérios listados na Tabela 11, apresenta uma função de pertinência para este critério igual a zero ( $\mu(x) = 0$ ), desabilitando-o para a produção do componente em análise. Deste modo, pelo produto de todas as funções de pertinência de um processo, pode-se identificar se ele atende respectivamente a todos os critérios da separação inicial. A equação (11) descreve este procedimento.

$$S_i = \left[ \prod_{j=1}^{m_{si}} \mu_{ij} \right]^{1/m_{si}}, j = 1, 2, \dots, m_{si} \quad \text{Equação (11)}$$

Em que:

$S_i$  = Índice de separação do processo  $i$  em relação aos  $m_{si}$  critérios utilizados nesta etapa;

$\mu_{ij}$  = é o valor da função de pertinência para o processo  $i$  em relação ao critério  $j$  avaliado.

A equação (11) é uma função de agregação conjuntiva, por ser multiplicativa (BELIAKOV *et al.*, 2007). Apenas os processos que apresentarem o índice de separação maior que zero serão considerados na etapa de classificação técnica. Caso nenhum dos processos de fundição de metais considerados no MMSPF apresente um índice de separação maior que zero, é um indício de que os requisitos do componente em análise não estão adequados à fabricação por fundição de metais, e devem ser revisados.

### 3.2.4 Determinação dos Pesos dos Critérios de Classificação Técnica

Com o conjunto de processos, obtidos na etapa de separação inicial, realiza-se a classificação técnica. Antes de desenvolver essa etapa é necessário determinarem-se os critérios e seus respectivos pesos em relação ao componente em análise. Os critérios utilizados na classificação técnica são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Critérios utilizados na classificação técnica

<b>Grupo de critérios</b>	<b>Critérios de classificação técnica</b>
Forma ( $\varphi_1$ )	Complexidade de forma ( $\omega_1$ )
	Tolerância dimensional ( $\omega_2$ )
Produção ( $\varphi_2$ )	<i>Lead time</i> ( $\omega_3$ )
	Tamanho de lote ( $\omega_4$ )
	Nível relativo de porosidade ( $\omega_5$ )
Qualidade metalúrgica ( $\varphi_3$ )	Nível relativo de propriedades mecânicas ( $\omega_6$ )
	Emissões gasosas ( $\omega_7$ )
Impacto Ambiental ( $\varphi_4$ )	Toxidez dos resíduos gerados ( $\omega_8$ )

FONTE: Autor.

Os grupos de critérios de forma, produção e qualidade metalúrgica, listados na Tabela 12, são compostos por critérios utilizados pelos principais métodos de seleção de processos de fundição de metais analisados na seção 2.3. E, conforme discussão apresentada na seção 2.3.9, os critérios complexidade de forma, tolerância dimensional, *lead time*, tamanho do lote, nível relativo de porosidade e propriedades mecânicas são adequados para serem utilizados na classificação técnica dos processos de fundição de metais, realizada pelo MMSPF. Os critérios de emissões gasosas e a toxidez dos resíduos gerados, que compõem o grupo de

critérios de impacto ambiental, se constituem em uma iniciativa do MMSPF de inserir aspectos ambientais como critérios para selecionar processos de fundição de metais.

Os pesos dos grupos de critérios de forma, produção, qualidade metalúrgica e impacto ambiental são obtidos de acordo com as preferências do decisor (projetista do componente) em relação a função que o componente irá desempenhar. Inicialmente, determina-se o peso para cada um dos grupos de critérios, e a partir destes, os pesos dos demais critérios utilizados na classificação técnica. O método de decisão multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP), proposto por Saaty (1977), foi a ferramenta utilizada para esta avaliação. Para aplicação do método AHP, o passo inicial é a construção da matriz de comparação quadrada de ordem  $n$ , em que  $n$  representa o número de grupos de critérios (4). O preenchimento da matriz necessita da realização de julgamentos pareados, nos quais os grupos de critérios são comparados dois a dois com base em uma escala de comparação adequada, como a apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – Escala de comparação para preferências do decisor

Nível de Importância	Escala Numérica
Extremamente não importante	1/5
Não importante	1/3
Igualmente importante	1
Importante	3
Extremamente importante	5

FONTE: Chou (2009).

Os elementos  $a_{ij}$ , acima da diagonal principal da matriz, são obtidos por meio de julgamentos pareados. Os elementos da diagonal principal são iguais a 1. Os elementos abaixo da diagonal principal são recíprocos dos valores obtidos acima da diagonal principal, ou seja,  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ . Após a obtenção da matriz de comparações, deve-se realizar os cálculos para encontrar o máximo autovalor, o qual permite obter os valores normalizados para o peso de cada um dos grupos de critérios. O procedimento de cálculo, adotado neste passo, é a normalização aditiva (Srdjevic, 2005). As equações (12) e (13) apresentam a formulação matemática deste procedimento, consistindo-se em dividir os elementos de cada coluna pela soma daquela coluna, e no próximo passo, somar os elementos em cada linha e dividir esta soma pelo número de elementos da linha.

$$a'_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^m a_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, m. \quad \text{Equação (12)}$$



$$\varphi_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a'_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, m. \quad \text{Equação (13)}$$

Em que:

$\alpha_{ij}$  = elemento da matriz de comparações;

$\alpha'_{ij}$  = elemento normalizado da matriz de comparações;

$\varphi_j$  = é o peso normalizado do grupo de critérios  $j$ .

Após a determinação do vetor de prioridades dos pesos dos grupos dos critérios é necessário avaliar o índice de consistência deste vetor. O índice de consistência harmônico (ICH) proposto por Stein e Mizzi (2007) será o procedimento utilizado nesta avaliação. As equações empregadas são as mesmas descritas na seção 2.4.2.

Na utilização do índice de consistência harmônico, Stein e Mizzi (2007) consideram os valores de RC propostos por Saaty (1994), no qual uma matriz de ordem quatro pode apresentar um RC máximo de 0,08. Caso se obtenha um RC maior que este valor, os julgamentos da matriz de comparações devem ser refeitos.

Após a determinação do peso dos grupos dos critérios, utiliza-se o método AHP dentro de cada grupo. Neste caso, será necessário realizar uma comparação pareada dos critérios, pois cada grupo possui apenas dois critérios. O peso de cada critério utilizado na classificação técnica é obtido pela multiplicação do peso do grupo do critério ( $\varphi_j$ ) pelo resultado da comparação dentro do grupo do critério.

O procedimento adotado para determinarem-se os pesos dos critérios de classificação técnica permite que se atribua pesos maiores aos critérios mais importantes para seleção, de acordo com as preferências do decisor, ou seja, conforme os requisitos exigidos pelo componente.

### 3.2.5 Classificação Técnica

A classificação técnica é realizada com base nas informações provenientes da etapa de tratamento das informações. Inicialmente, é gerada uma matriz com número de linhas igual ao número de processos de fundição de metais, aprovados na etapa de separação inicial e com oito colunas, sendo uma para cada um dos critérios da classificação técnica. Esta matriz necessita ser normalizada para que os valores sejam comparáveis (YOON E HANG, 1995;

LING, 2006; KAHRAMAN *et al.*, 2008). A equação (14) apresenta o procedimento de normalização.

$$\mu'_{ij} = \mu_{ij}^2 / \sum_{i=1}^n \mu_{ij}^2, i = 1, 2, \dots, n. \quad \text{Equação (14)}$$

A ordem de classificação dos processos de fundição de metais é obtida por meio de ponderação aditiva, na qual as funções de pertinência normalizadas são associadas com os pesos de cada critério para se obter a classificação técnica. Este procedimento é apresentado na equação (15).

$$R_i = \sum_{j=1}^m \omega_j \cdot \mu'_{ij}, j = 1, 2, \dots, m \quad \text{Equação (15)}$$

Em que:

$R_i$  = é o índice de classificação técnica do processo  $i$ ;

Apenas serão classificados para o módulo de seleção econômica, os processos que obtiverem um valor de  $R_i$  maior ou igual ao parâmetro de corte (compatibilidade técnica mínima) que é igual  $1/n$ , onde  $n$  representa o número de processos de fundição de metais que foram aprovados na etapa de separação inicial.

### 3.3 MÓDULO DE SELEÇÃO ECONÔMICA

O módulo de seleção econômica é composto pelas etapas operacionais de: (i) determinação do modelo de estimação de custo e (ii) avaliação econômica.

#### 3.3.1 Determinação do Modelo de Estimação de Custo

O modelamento de custos na etapa de desenvolvimento do produto tem a finalidade de demonstrar o impacto de decisões tecnológicas e econômicas relativas ao desenvolvimento do componente sobre o custo de fabricação, e deste modo, pode-se optar pela solução que melhor atende aos requisitos comerciais do componente.

O passo inicial do desenvolvimento do modelo de estimação de custos de fabricação é determinar quais elementos irão compor os custos de fabricação. De acordo com Johnson e Kirchain (2009), os custos de fabricação de um componente podem ser divididos em custos

fixos e variáveis. Segundo estes autores, os principais custos variáveis são: material, mão de obra, energia e os principais custos fixos são: equipamentos, espaço construído, ferramental, manutenção e despesas fixas indiretas (como depreciação e administrativos).

Chougule e Ravi (2006) consideram que os custos de fabricação são material direto, material indireto, mão de obra, energia e os custos fixos como, ferramental e custos indiretos (como depreciação e administrativos). Esses autores apresentam equações analíticas para a apuração dos custos de cada um destes elementos. Na abordagem desses autores, o custo é apurado na etapa de produção, quando estão disponíveis os dados para determinar de modo preciso o custo do componente fundido.

No modelo de estimação de custos de fabricação de componentes fundidos do MMSPF, os custos indiretos não são considerados pois esta parcela do custo tem uma dependência maior das características da empresa que produz o componente do que das características intrínsecas do processo, sendo por isso de difícil estimação nesta fase.

O modelo proposto nesta tese para estimar o custo de fabricação de um componente fundido inclui os custos variáveis de material direto, molde, energia e processamento. Considera apenas o custo do ferramental como custo fixo. A equação (16) apresenta esta descrição.

$$C_f = C_{md} + C_{mo} + C_{en} + C_{pro} + C_{fer} \quad \text{Equação (16)}$$

Na qual:

$C_f$  = custo de fabricação do componente fundido em R\$;

$C_{md}$  = custo do material direto em R\$;

$C_{mo}$  = custo do molde em R\$;

$C_{en}$  = custo da energia em R\$;

$C_{pro}$  = custo do processamento em R\$;

$C_{fer}$  = custo do ferramental em R\$;

O custo fixo do ferramental é característico de cada processo, sendo uma informação que pode ser obtida na etapa de desenvolvimento por meio de cotação com fornecedores, de estimação, com base em valores de ferramentais já desenvolvidos anteriormente, ou por meio de um valor máximo estipulado para o custo do ferramental. O custo de ferramental deve incluir a depreciação do mesmo ao longo de sua utilização, bem como os custos associados a sua manutenção.

Os custos variáveis de material direto, molde, energia e processamento podem ser obtidos a partir de equações analíticas, como as equações propostas nos trabalhos de Creese *et al.* (1992), Ravi (2005), Chougule e Ravi (2006) e Stoll (2009). Porém, no estágio inicial do desenvolvimento, a maior parte das informações necessárias à aplicação destas equações não estão disponíveis.

Desta forma, é necessário adotar um procedimento para que o custo de fabricação de um processo de fundição possa ser comparado com o custo de fabricação dos demais processos, envolvidos na análise. A estratégia adotada para solucionar estes dois problemas foi determinar o custo base de um processo e utilizar coeficientes para apontar o custo dos demais processos de fundição de metais. Com a utilização de coeficientes que considerem as diferenças técnicas e produtivas, a equação (16) pode ser ajustada para que seja possível realizar comparações entre os processos de fundição de metais, conforme equação 17.

$$Cf_i = kmd_i \cdot C_{md} + kmo_i \cdot C_{mo} + ken_i \cdot C_{en} + kpro_i \cdot C_{pro} + kf \cdot CF_i \quad \text{Equação (17)}$$

Na qual:

$Cf_i$  = é a estimativa do custo de fabricação do componente em análise no processo  $i$  em R\$;

$kmd_i$  = Coeficiente de adequação do custo de material direto para o processo  $i$ ;

$kmo_i$  = Coeficiente de adequação do custo do molde para o processo  $i$ ;

$ken_i$  = Coeficiente de adequação do custo de energia para o processo  $i$  em kwh/kg;

$kpro_i$  = Coeficiente de adequação do custo de processamento para o processo  $i$ ;

$kf$  = Coeficiente de adequação do ferramental;

$CF_i$  = Custo de ferramental para o processo  $i$  em R\$;

Os coeficientes de material direto, molde, energia e processamento são obtidos por meio de comparações entre as características técnicas dos processos de fundição de metais. Nos processos de fundição metais que utilizam molde metálico, o coeficiente de adequação do molde é igual a zero, de modo que esse custo não é considerado nestes processos. A determinação dos coeficientes é apresentada em maiores detalhes na seção 3.3.2.

O coeficiente de ferramental é um valor inteiro, obtido pela razão entre o lote total a ser produzido e a vida útil do ferramental. Este coeficiente tem a finalidade de determinar o valor total envolvido com o custo fixo do ferramental.

O passo final do desenvolvimento do modelo de estimação de custos de fabricação proposto nesta tese é realizado sob a abortagem do modelamento técnico de custo, proposto

por Szekely *et al.* (1996), em que cada parcela que compõe a equação (17) é associada com características técnicas do processo de fundição de metais que podem ser determinadas ou estimadas na etapa do desenvolvimento do produto. As características técnicas adotadas são: (i) custo do material, (ii) custo do ferramental, (iii) rendimento metalúrgico, (iv) relação entre peso do molde e metal (obtidos a partir do peso do molde e do número de peças do ferramental), (v) peso do componente e tamanho de lote. A equação (18) apresenta o modelo completo para estimação de custos de fabricação de componentes fundidos na etapa de desenvolvimento do produto proposto nesta tese.

$$CP_i = kmd_i \cdot Cb_{md} + R \cdot kmo_i \cdot Cb_{mo} + \frac{ken_i \cdot Cb_{en}}{Y} + \frac{kpro_i \cdot Cb_{pro}}{Y} + \frac{kf \cdot CF_i}{T \cdot P} \quad \text{Equação (18)}$$

Em que:

$CP_i$  = é a estimativa do custo de produção do componente em análise no processo  $i$  em R\$/kg;

$Cb_{md}$  = Custo do material direto do componente em R\$/kg;

$R$  = é a relação material molde por metal líquido;

$Cb_{mo}$  = Custo do molde base em R\$/kg;

$Cb_{en}$  = Custo da energia base em R\$/kwh;

$Y$  = é o rendimento metalúrgico;

$Cb_{pro}$  = Custo do processamento base em R\$/kg;

$P$  = é o peso do componente em kg;

$T$  = é o tamanho do lote anual do componente em análise;

Com base na equação (18) é possível contemplar todos os processos de fundição de metais apresentados no MMSPF. Também, com a equação (18) é possível modelar o impacto da escolha do material do componente e da configuração do ferramental sobre o custo de fabricação do componente em análise. De acordo com as exigências mecânicas do componente (material) e o do seu ciclo de vida (configuração do ferramental), pode-se realizar decisões direcionadas para reduzir os custos de fabricação do componente avaliado.

### 3.3.2 Determinação dos Coeficientes do Modelo de Estimação de Custo

Esta seção apresenta os coeficientes utilizados no modelo de estimação de custos de fabricação de componentes fundidos proposto nesta tese.

### 3.3.2.1 Coeficiente de material direto

O coeficiente relativo a material direto considera as perdas associadas com material durante as etapas de fabricação do componente fundido nos diferentes processos de fundição de metais. Como observado por Chougule e Ravi (2006), o custo de material direto é adequadamente apurado quando se observam as perdas de metal durante a fusão, vazamento e acabamento final. Esses autores sugerem coeficientes para cada uma destas perdas como apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Faixa de valores para o fator de perda associada a fusão, vazamento e rebarbação

<b>Tipo de Perda</b>	<b>Fator</b>
Perda na fusão	1,01 - 1,12
Perda no vazamento	1,01 - 1,07
Perda no acabamento final	1,01 - 1,07

FONTE: Chougule e Ravi (2006).

Considerando como perdas de material direto apenas as apresentadas na Tabela 14, o coeficiente de material direto pode assumir valores entre 1,03 e 1,282, que é o valor do produto dos três fatores no limite inferior e no superior respectivamente.

A perda que ocorre na fusão está diretamente associada ao tipo de metal e o tipo de forno de fusão utilizado. Com base nos dados apresentados pela *Cast Metals Coalisation (1998)* e utilizando-se de informações de fundições brasileiras obtidas do anuário da ABIFA (2009), é possível estimarem-se os fornos mais utilizados na fusão dos metais que são contemplados pelo MMSPF e, a partir da ponderação desses valores, determinar, para cada metal, um valor para o índice de perda na fusão. A Tabela 15 apresenta os dados de perda na fusão em função do metal e do forno utilizado, dados da utilização do tipo de forno e o fator de perda na fusão calculado a partir dessas informações.

Tabela 15 – Perda na fusão em relação ao metal e ao tipo de forno, percentual de utilização do forno e fator de perda de fusão adotado no cálculo do coeficiente de material direto

<b>Metal e forno utilizado na fusão</b>	<b>Fator de perda na fusão<sup>1</sup></b>	<b>% de Utilização<sup>2,3</sup></b>	<b>Fator de perda na fusão<sup>3</sup></b>
Aços para fundição – Arco direto	1,05 - 1,08	39,30	1,041
Aços para fundição - Indução	1,02 - 1,03	60,70	

Continua

Tabela 15 - conclusão

<b>Metal e forno utilizado na fusão</b>	<b>Fator de perda na fusão<sup>1</sup></b>	<b>% de Utilização<sup>2,3</sup></b>	<b>Fator de perda na fusão<sup>3</sup></b>
Alumínio – Revérbero a gás	1,03 - 1,05	70,90	
Alumínio – Revérbero elétrico	1,01 - 1,02	8,00	1,035
Alumínio – Cadinho a gás	1,03 - 1,04	12,60	
Alumínio – Indução	1,0075 - 1,0125	8,50	
Cobre – Cadinho a gás	1,02 - 1,03	10,85	1,016
Cobre – Indução	1,01 - 1,02	89,15	
Ferro fundido - Cubilô	1,03 - 1,12	24,60	1,030
Ferro fundido - Indução	1,01 - 1,02	75,40	
Magnésio – Cadinho a gás	1,04 - 1,06	90,70	1,048
Magnésio – Indução	1,02 - 1,03	9,30	
Zinco – Revérbero a gás	1,04 - 1,07	49,00	1,040
Zinco – Revérbero elétrico	1,02 - 1,03	51,00	

FONTE: *Metals Coalisation* (1998)<sup>1</sup>. ABIFA (2009)<sup>2</sup>. Autor<sup>3</sup>.

As perdas de metal durante a etapa de vazamento ocorrem, principalmente, como resultado do derramamento e respingos durante o vazamento dos moldes. Considerando-se que a maior parte deste metal é recuperada nas operações de reciclagem dos materiais dos moldes, e que, nos processos de moldes metálicos a recuperação é facilitada, as perdas que ocorrem no vazamento podem ser estimadas como menores do que as que ocorrem na fusão. Para processos de vazamento automatizado ou executado por equipamentos, considerou-se uma perda de material na etapa de vazamento da ordem de 0,5%. Nesta categoria encontram-se os processos de areia verde – automatizada, molde permanente – baixa pressão, fundição sob pressão (*die casting*) e *squeeze casting*. Para os demais processos foi considerada uma perda da ordem de 1% na etapa de vazamento.

As perdas de material, que ocorrem no acabamento final, são resultantes da remoção de rebarbas, restos de canais e massalotes. Este tipo de perda de material está associada à precisão dimensional dos processos, ou seja, processos de precisão possuem menores perdas de material no acabamento final. Segundo DOE (1999) as perdas associadas ao acabamento final são da ordem de 0,5 a 1%. Com base nestas ponderações, considerou-se para os processos de fundição de metais julgados de precisão, como os processos de areia verde – automatizada, areia com resina – *shell molding*, processo molde de gesso, processo molde cerâmico, *investment casting*, molde permanente – gravidade e baixa pressão, fundição sob pressão (*die casting*) e *squeeze casting*, uma perda de material na etapa do acabamento final de 0,5%; para os demais processos considerou-se uma perda de 1%.

Deste modo, pela associação das perdas de fusão, vazamento e acabamento final obtém-se o coeficiente de material direto para os processos de fundição de metais e para as

diferentes ligas contempladas no MMSPF, apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Coeficiente de material direto para os processos de fundição de metais e para as diferentes ligas contempladas no MMSPF

Processos de Fundição		AF	FF	LA	LC	LM	LZ
P1	Areia verde – manual	1,062	1,051	1,056	1,037	1,069	ND
P2	Areia verde – mecanizada	1,062	1,051	1,056	1,037	1,069	ND
P3	Areia verde – automatizada	1,051	1,040	1,045	1,026	1,058	ND
P4	Areia silicato - CO <sub>2</sub>	1,062	1,051	1,056	1,037	1,069	1,061
P5	Areia com resina – cura frio	1,062	1,051	1,056	1,037	1,069	1,061
P6	Areia com resina – <i>shell molding</i>	1,056	1,045	1,050	1,031	ND	ND
P7	Processo molde de gesso – <i>plaster molding</i>	ND	ND	1,050	1,031	1,063	1,055
P8	Processo molde cerâmico	1,056	1,045	1,050	1,031	1,063	1,055
P9	<i>Investment casting</i>	1,056	1,045	1,050	1,031	1,063	1,055
P10	Molde cheio - <i>lost foam</i>	ND	1,051	1,056	1,037	1,069	1,061
P11	Fundição centrífuga - molde metálico	ND	ND	1,056	1,037	1,069	1,061
P12	Molde permanente - gravidade	ND	1,045	1,050	1,031	1,063	1,055
P13	Molde permanente - baixa pressão	ND	ND	1,045	1,026	1,058	1,050
P14	Fundição sob pressão - <i>die casting</i>	ND	ND	1,045	1,026	1,058	1,050
P15	<i>Squeeze casting</i>	ND	ND	1,045	1,026	1,058	1,050

FONTE: Autor.

LEGENDA: ND – Não determinado. Combinação liga e processo não contemplada no MMSPF.

### 3.3.2.2 Coeficiente do Molde

O coeficiente de adequação do custo do molde considera a diferença de valor existente entre os materiais utilizados na confecção dos moldes nos processos de fundição de metais. Estas diferenças existem em função da grande diversidade de materiais utilizadas na confecção dos moldes. Nos processos de molde metálico em que não é necessário confeccionar o molde para cada peça a ser produzida, este coeficiente é igual a zero. Desta maneira, nestes processos não se considera o custo do molde na estimação do custo de fabricação. A Tabela 17 apresenta os coeficientes de adequação de custo de molde para os processos de fundição de metais, obtidos a partir dos custos de materiais envolvidos na confecção dos moldes.

Tabela 17 – Coeficiente do molde para os processos de fundição de metais contemplados no MMSPF

Processos de Fundição	K <sub>mo</sub>
Areia verde – manual	1,00
Areia verde – mecanizada	1,00

Continua



Tabela 17 - conclusão

Processos de Fundição	$K_{mo}$
Areia verde – automatizada	1,00
Areia silicato - CO <sub>2</sub>	4,06
Areia com resina – cura frio	2,29
Areia com resina – <i>shell molding</i>	5,58
Processo molde de gesso – <i>plaster molding</i>	12,58
Processo molde cerâmico	13,11
<i>Investment casting</i>	23,02
Molde cheio - <i>lost foam</i>	1,32
Fundição centrífuga - molde metálico	0,00
Molde permanente - gravidade	0,00
Molde permanente - baixa pressão	0,00
Fundição sob pressão - <i>die casting</i>	0,00
<i>Squeeze casting</i>	0,00

FONTE: Autor.

### 3.3.2.3 Coeficiente de energia

O coeficiente de adequação do custo de energia leva em consideração as diferenças de consumo de energia entre os diferentes processos de fundição de metais. A determinação deste coeficiente está diretamente associada ao tipo de metal do componente e das características intrínsecas do processo, tais como nível de automação, utilização de energia na cura dos moldes como no processo *shell molding*.

De acordo com DOE (1999), cerca de 55% da energia consumida é destinada a etapa de fusão, e o restante, distribuído entre as outras etapas do processamento do componente fundido. A energia utilizada na etapa de fusão pode ser determinada de forma analítica com base na equação (8), proposta por Ravi (2005). A Tabela 18 apresenta as informações utilizadas na aplicação da equação (8) para ligas contempladas no MMSPF.

Tabela 18 – Informações utilizadas na aplicação da equação (8), a qual é utilizada na apuração do coeficiente de energia

Ligas utilizadas no MMSPF	$L$ (kJ/kg)	$C_{ps}$ (kJ/kg.K)	$C_{pa}$ (kJ/kg.K)	$T_p$ (°C)	$T_s$ (°C)	$f_{\eta}^5$
Aços para fundição <sup>1</sup>	260	0,679	0,670	1680	1495	1,92
Ferros fundidos <sup>1,2</sup>	272	0,795	0,550	1390	1155	2,08
Ligas de alumínio <sup>1</sup>	381,9	1,059	1,092	750	645	3,23
Ligas de cobre <sup>1</sup>	205	0,494	0,490	1150	990	1,88
Ligas de magnésio <sup>3</sup>	370	1,400	1,020	760	650	3,21
Ligas de zinco <sup>4</sup>	100,9	0,395	0,382	450	390	2,52

FONTE: (1) Garcia (2007); (2) Ravi (2005); (3) NADCA (2006); (3) ICZ (2010); (5) Autor.

O consumo médio de cada processo, em relação às demais etapas do processamento, pode ser estimado com base nos dados existentes na literatura como os apresentados em *Cast Metals Coalisation (1998)* e DOE (1999). Com a energia utilizada para a fusão das ligas, nesta parcela, o coeficiente de perda na fusão também é considerado, e com a proporção de utilização nas outras etapas do processamento, é possível calcular o coeficiente de energia. A Tabela 19 apresenta os coeficientes para adequação do custo de energia para os diferentes processos de fundição de metais contemplados no MMSPF

Tabela 19 – Coeficiente de energia para as diferentes ligas e processos de fundição contemplados no MMSPF em kwh/kg

Processos de Fundição		AF	FF	LA	LC	LM	LZ
P1	Areia verde – manual	1,556	0,867	1,203	0,700	0,992	ND
P2	Areia verde – mecanizada	1,556	0,867	1,203	0,700	0,992	ND
P3	Areia verde – automatizada	1,540	0,858	1,191	0,693	0,983	ND
P4	Areia silicato - CO <sub>2</sub>	1,556	0,867	1,203	0,700	0,992	0,195
P5	Areia com resina – cura frio	1,556	0,867	1,203	0,700	0,992	0,195
P6	Areia com resina – <i>shell molding</i>	1,780	0,992	1,377	0,801	ND	ND
P7	Processo molde de gesso – <i>plaster molding</i>	ND	ND	1,197	0,696	0,988	0,194
P8	Processo molde cerâmico	1,548	0,863	1,197	0,696	0,988	0,194
P9	<i>Investment casting</i>	1,858	1,035	1,437	0,835	1,185	0,233
P10	Molde cheio - <i>lost foam</i>	ND	0,867	1,203	0,700	0,992	0,195
P11	Fundição centrífuga - molde metálico	ND	ND	1,324	0,770	1,092	0,215
P12	Molde permanente - gravidade	ND	0,949	1,317	0,766	1,086	0,214
P13	Molde permanente - baixa pressão	ND	ND	1,311	0,762	1,081	0,213
P14	Fundição sob pressão - <i>die casting</i>	ND	ND	1,191	0,693	0,983	0,193
P15	<i>Squeeze casting</i>	ND	ND	1,191	0,693	0,983	0,193

FONTE: Autor.

LEGENDA: ND – Não determinado. Combinação liga e processo não contemplada no MMSPF.

### 3.3.2.4 Coeficiente de processamento

O coeficiente de adequação do custo de processamento compreende todas as operações para se obter o componente fundido. Segundo Stoll (2009), na determinação do tempo de processamento, deve-se considerar todas as etapas que agregam valor e também o tempo improdutivo, o qual é entendido no trabalho de Chougule e Ravi (2006) como rendimento das operações.

A determinação do custo do processamento, na etapa de desenvolvimento, apresenta dificuldades que podem gerar uma estimação do custo de forma imprecisa. As taxas de produção dos processos de fundição de metais estão disponíveis na literatura, porém o processamento corresponde às demais etapas do processo de fundição, como vazamento, desmoldagem, quebra de canal e acabamento final.

Deste modo, propõe-se determinar os coeficientes de processamento por meio da produtividade apresentada pelos processos de fundição de metais. No cálculo dos índices de processamento, foram utilizados valores médios das produtividades dos processos de fundição de metais de fundições brasileiras apresentados no anuário da ABIFA (2009). A Tabela 20 apresenta os coeficientes de processamento adotados no modelo de estimação de custos do MMSPF.

Tabela 20 – Coeficiente de processamento para os processos de fundição de metais contemplados no MMSPF

<b>Processos de Fundição</b>	<b>K<sub>pro</sub></b>
Areia verde – manual	3,23
Areia verde – mecanizada	1,52
Areia verde – automatizada	1,01
Areia silicato - CO <sub>2</sub>	1,72
Areia com resina – cura frio	1,72
Areia com resina – <i>shell molding</i>	2,10
Processo molde de gesso – <i>plaster molding</i>	5,38
Processo molde cerâmico	5,38
<i>Investment casting</i>	4,57
Molde cheio - <i>lost foam</i>	2,15
Fundição centrífuga - molde metálico	1,70
Molde permanente - gravidade	1,70
Molde permanente - baixa pressão	1,16
Fundição sob pressão - <i>die casting</i>	1,00
<i>Squeeze casting</i>	1,38

FONTE: Autor.

### 3.3.3 Avaliação Econômica

Na etapa de avaliação econômica, os resultados da opção de melhor custo em cada processo de fundição são combinados com o resultado da classificação técnica para identificar o processo que apresente o melhor resultado em termos técnicos e econômicos. Os processos aprovados na classificação técnica têm os seus valores de  $R_i$  normalizados com base na equação (19).

$$R'_i = R_i / \sum_{i=1}^z R_i, i = 1, 2, \dots, z. \quad \text{Equação (19)}$$

Em que:

$R'_i$  = é o índice de classificação técnica do processo  $i$  normalizado;

A escolha do melhor processo é realizado com base no índice de custo relativo ao desempenho técnico apresentado na equação (20).

$$\alpha_i = \frac{CP_i}{R'_i} \quad \text{Equação (20)}$$

Quando:

$\alpha_i$  = é o índice de custo relativo ao desempenho técnico do processo  $i$  em R\$/kg.

O processo a ser selecionado é o que apresentar o menor valor do índice de custo relativo ao desempenho técnico, pois é o que demonstra a melhor combinação entre os aspectos técnicos e econômicos para a produção do componente em análise.

## 4 APLICATIVO COMPUTACIONAL DO MMSPF

Neste capítulo, apresenta-se a terceira etapa do trabalho desenvolvido nesta tese, o desenvolvimento de um aplicativo computacional baseado no MMSPF. Inicialmente é apresentada a arquitetura do aplicativo computacional. Um exemplo apresentado em Er e Dias (2000) foi utilizado para ilustrar as etapas operacionais do aplicativo computacional do MMSPF.

### 4.1 ARQUITETURA DO APLICATIVO COMPUTACIONAL DO MMSPF

A arquitetura de *software*, segundo Kruchten *et al.* (2006), descreve o modo como os componentes de um sistema interagem no desempenho de suas funções, e como estes elementos estão estruturados e organizados. De acordo com estes autores, a arquitetura de *software* captura e preserva intenções do desenvolvedor sobre a estrutura e o comportamento do sistema. A arquitetura do aplicativo computacional do MMSPF é composta por um *software* de planilha eletrônica, um banco de dados para armazenamento das informações dos processos e um conjunto de interfaces gráficas para o usuário, como pode ser visto na Figura 13.

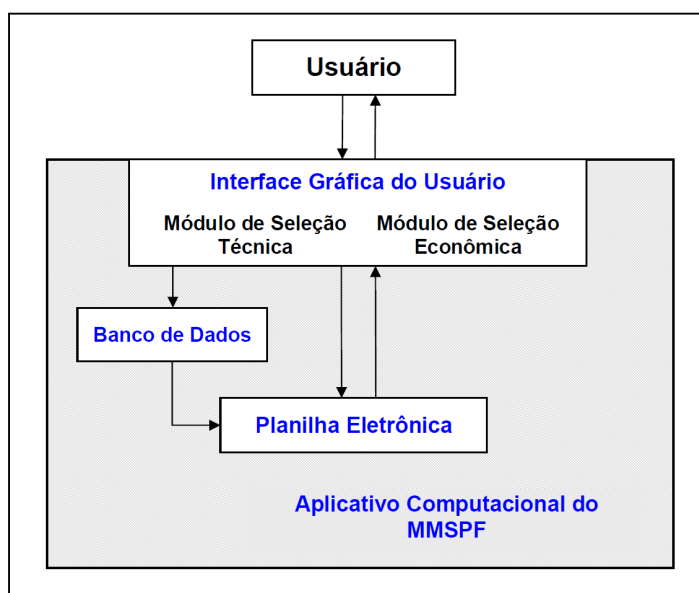


Figura 13 – Arquitetura do aplicativo computacional do MMSPF

FONTE: Autor.

O *software* de planilha eletrônica (Microsoft Excel) é o elemento responsável pelo processamento das informações do componente em análise e dos processos de fundição de metais. Na planilha, são realizadas todas as operações matemáticas necessárias ao desenvolvimento das etapas operacionais do MMSPF. A Figura 14 apresenta a planilha eletrônica para a etapa de separação inicial.

Critérios de Separação Inicial	Dados	Resultado da Separação Inicial
Critério 1 - Peso componente (kg)	4,5	Areia Verde – Manual
Critério 2 - Maior dimensão (mm)	400	Areia Verde – Mecanizada
Critério 3 - Maior espessura seção (mm)	12	Areia Verde – Automatizada
Critério 4 - Menor espessura seção (mm)	2,5	Areia Silicato - CO2
Critério 5 - Ângulo extração mínimo (°)		Areia com Resina – Cura frio
Critério 6 - Rugosidade superficial máxima Ra (µm)	8	Areia com Resina – Shell Molding
Critério 7 - Material	3	
Ligas de Aço para Fundição		Processo Molde Cerâmico
Ferros Fundidos		Investment Casting
Ligas de Alumínio para Fundição	x	Molde Cheio - Lost Foam
Ligas de Cobre para Fundição		Molde Centrifuga - Molde Metálico
Ligas de Magnésio para Fundição		Molde Permanente - Gravidade
Ligas de Zinco para Fundição		Molde Permanente - Baixa Pressão
		Molde Permanente sob Pressão - Die Casting

Figura 14 – Planilha eletrônica da etapa de separação inicial do MMSPF

FONTE: Autor.

Pode-se observar na Figura 14 que as etapas operacionais do MMSPF são executadas em planilhas distintas, e a integração entre estas etapas é implementada pelos recursos existentes no *software* de planilha eletrônica.

Optou-se por utilizar um banco de dados independente da planilha para armazenar as informações dos processos de fundição de metais, contemplados no MMSPF. A finalidade deste procedimento é facilitar a inserção de novas informações na base de dados dos processos de fundição de metais e atribuir apenas a função de processamento à planilha eletrônica. O *software* SQLite é o elemento responsável por armazenar as informações utilizadas no aplicativo computacional do MMSPF.

O SQLite é uma biblioteca desenvolvida em C padrão (ANSI) – que pode ser integrada a programas escritos em diferentes linguagens com o intuito de possibilitar a

manipulação de dados, através de instruções SQL (*Structured Query Language*, ou Linguagem de Consulta Estruturada). A principal diferença em relação aos outros bancos de dados SQL é que o SQLite não necessita de uma programa de gerenciamento da base de dados; Ele é capaz de criar um arquivo em disco, inserir e recuperar as informações diretamente, a partir deste arquivo (GONÇALVES, 2010; SQLITE , 2010).

As principais características que levaram à utilização do SQLite como banco de dados do aplicativo computacional do MMSPF são: (i) simplicidade, não necessita de instalação, configuração ou de administração; (ii) *software* gratuito; (iii) biblioteca compacta, com todos os recursos habilitados, pode ser inferior a 300 KiB; (iv) confiabilidade, a maior parte do código fonte do SQLite é dedicado exclusivamente a testes de verificação.

A interface gráfica do usuário é o elemento de conexão entre o banco de dados, o *software* de planilha eletrônica e o usuário. As interfaces gráficas do usuário do MMSPF foram desenvolvidas em linguagem C Sharp (C#) com o aplicativo Visual Studio 2008 da Microsoft. A Figura 15 apresenta a interface gráfica do usuário para a etapa de separação inicial.

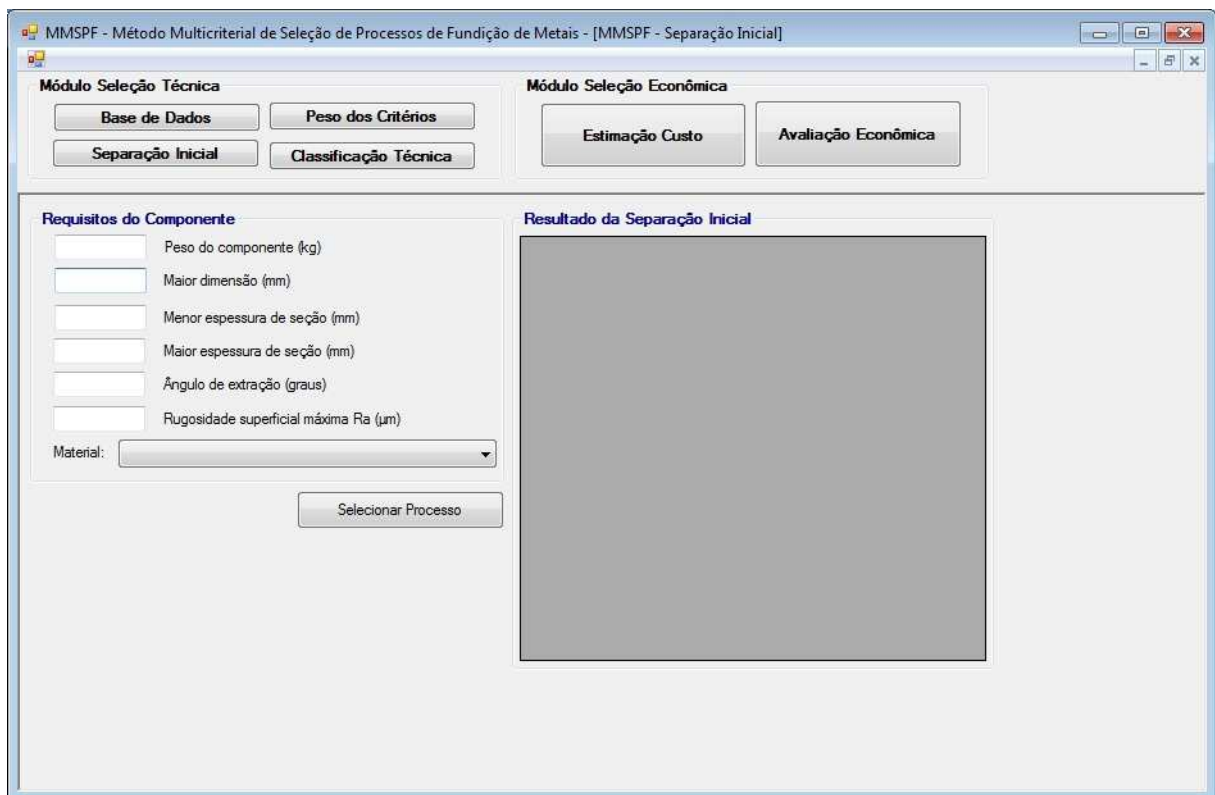


Figura 15 – Interface gráfica do usuário da etapa de separação inicial do MMSPF  
FONTE: Autor.

Pela interface, o usuário tem acesso ao módulo que deseja utilizar. A inserção de dados pelo usuário é realizada via interface. Nesta operação, a interface encaminha as informações para processamento na planilha eletrônica correspondente à etapa operacional, e retorna o resultado para o usuário. Segundo Depcik e Assanis (2005), a utilização de uma interface gráfica do usuário apresenta uma interação do usuário mais eficaz quando comparado com as abordagens baseadas em texto clássico, além de facilitar a inserção de dados, e de se obter o pronto retorno dos resultados.

Utilizou-se a linguagem C Sharp (C#) para relacionar os elementos da arquitetura para formar o aplicativo computacional do MMSPF. A Figura 16 apresenta a conexão entre a planilha eletrônica e interface gráfica para a etapa de separação inicial.

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
using Excel = Microsoft.Office.Interop.Excel;

namespace ProjetoDoutorado {
    public partial class frmSelecaoInicial : Form {
        public frmSelecaoInicial() {
            InitializeComponent();
        }

        private void btnSelecaoProcesso_Click(object sender, EventArgs e) {
            // -> Pega uma determinada planilha
            Excel._Worksheet sheet = (Excel._Worksheet)frmPrincipal.wb.Sheets[1];

            sheet.Cells[4, 2] = txtPeso.Text; //B4 - PesoComponente
            sheet.Cells[5, 2] = txtMaiorDimensao.Text; //B5 - MaiorDimensao
            sheet.Cells[6, 2] = txtMaiorEspessura.Text; //B6 - MaiorEspessuraSecao
            sheet.Cells[7, 2] = txtMenorEspessura.Text; //B7 - MenorEspessuraSecao
            sheet.Cells[8, 2] = txtAngulo.Text; //B8 - AnguloExtracaoMinimo
            sheet.Cells[9, 2] = txtRugosidade.Text; //B9 - RugosidadesuperficialMaxima

            String LigasAcoFundicao, FerrosFundidos, LigasAluminioFundicao,
                LigasCobreFundicao, LigasMagnesioFundicao, LigasZincoFundicao;
        }
    }
}
```

Figura 16 – Codificação da conexão entre a planilha eletrônica com a interface gráfica da etapa de separação inicial

FONTE: Autor.

Outros autores utilizaram o mesmo procedimento no desenvolvimento de aplicativos computacionais. Em Gözel *et al.* (2008) e Kelleher e Ringwood (2009), o *software* Matlab foi utilizado em conjunto como uma interface gráfica do usuário. O Matlab era responsável por executar as operações matemáticas dos modelos propostos por esses autores, e a interface gráfica do usuário era o meio de ligação com o usuário.



## 4.2 DEMONSTRAÇÃO DO APLICATIVO COMPUTACIONAL DO MMSPF

Todas as funções apresentadas pelo aplicativo computacional do MMSPF podem ser acessadas via interface gráfica do usuário inicial. Na parte superior, encontram-se os módulos de seleção técnica e econômica com suas respectivas etapas operacionais, editadas na forma de botões de acesso, como demonstrado na Figura 17.

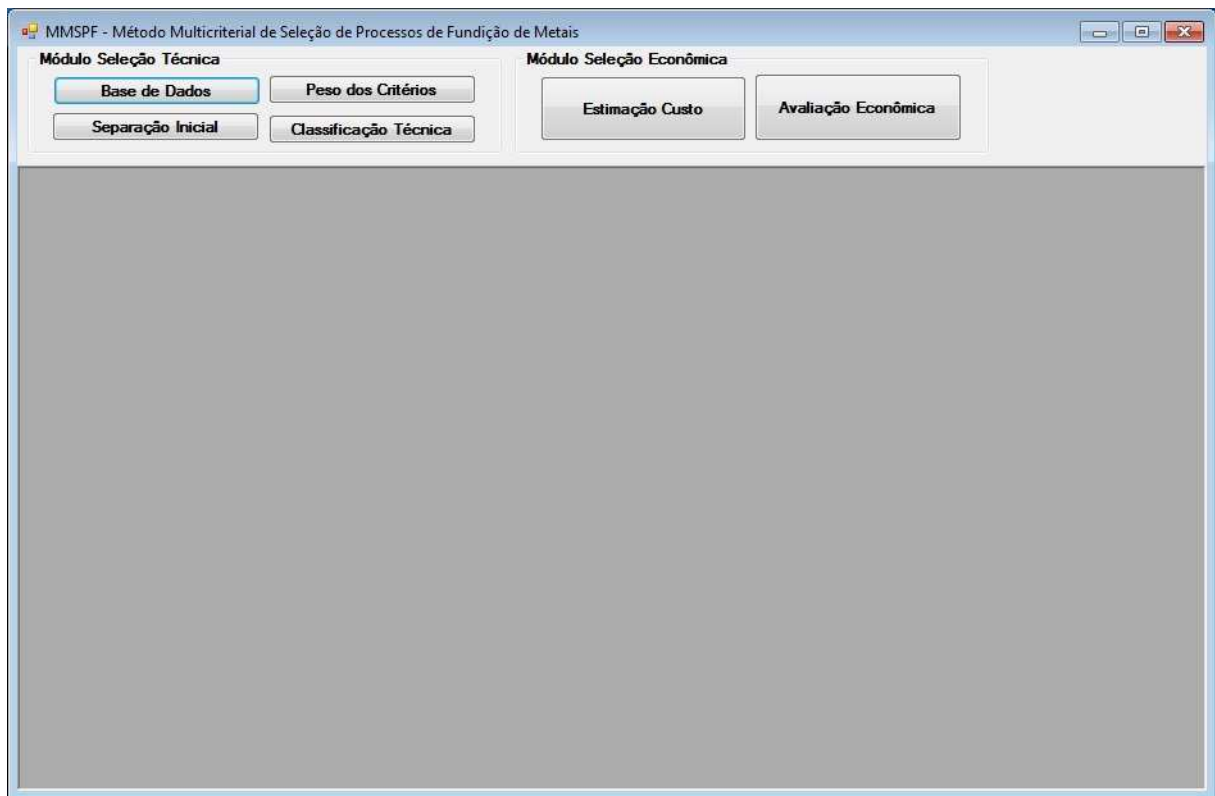


Figura 17 – Tela inicial da ferramenta computacional do MMSPF

FONTE: Autor.

A parte inferior da interface gráfica inicial do MMSPF é livre para permitir que as interfaces gráficas das etapas operacionais sejam exibidas na mesma tela. No lado esquerdo das interfaces gráficas, são exibidos os campos para inserção dos dados necessários à execução da etapa. À direita, os resultados da etapa obtidos, após o processamento das informações, são apresentados.

O módulo de seleção técnica é composto pelas etapas operacionais de base de dados, separação inicial, peso dos critérios e classificação técnica. A Figura 18 apresenta a interface gráfica quando o botão *base de dados* do módulo de seleção técnica é acionado.

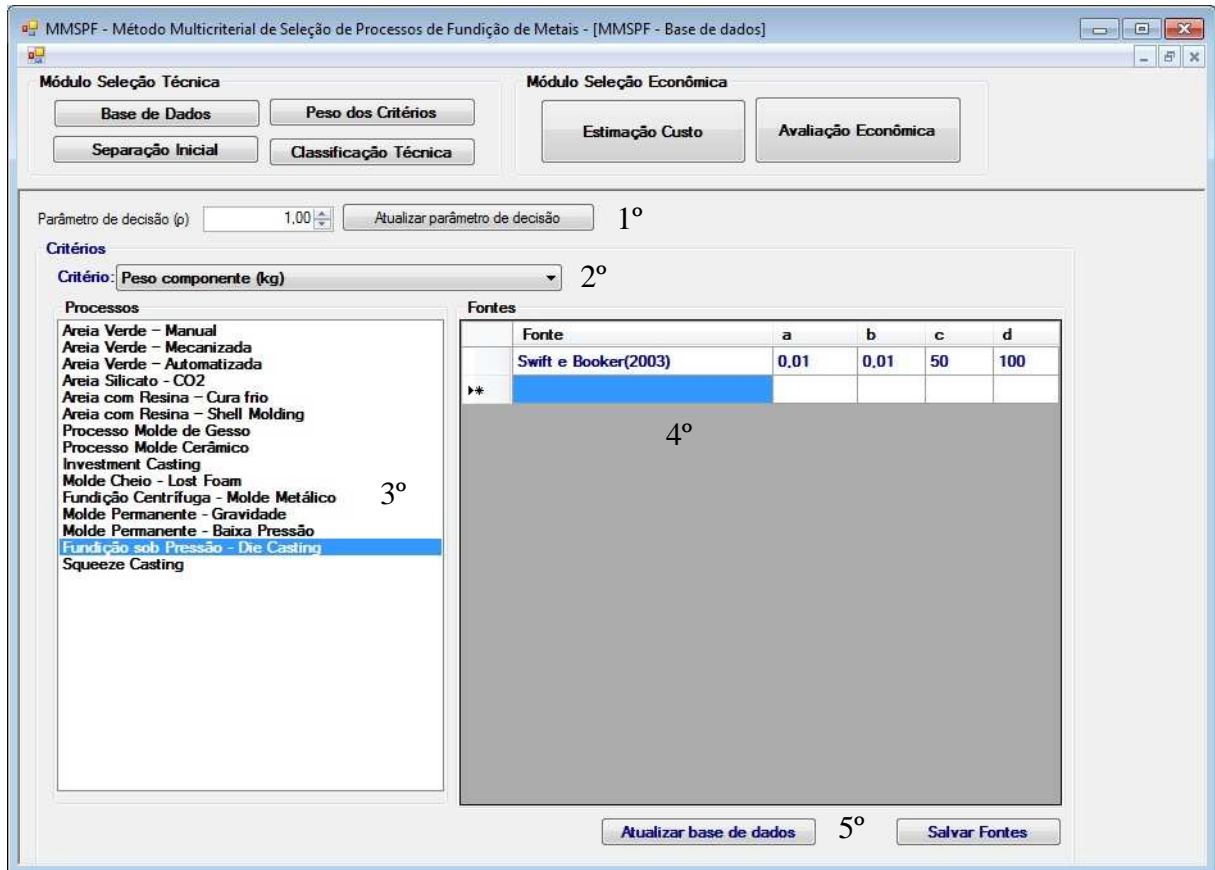


Figura 18 – Interface gráfica do usuário com o botão *base de dados* acionado  
 FONTE: Autor.

Conforme a numeração indicativa apresentada na Figura 18, a primeira ação nesta interface é escolher o valor do parâmetro de decisão ( $\rho$ ) o qual é utilizado na equação (10), para o tratamento das informações dos processos de fundição de metais. Após a inserção do valor é preciso acionar o botão atualizar *parâmetro de decisão*, para que o valor selecionado seja armazenado. A segunda ação consiste em selecionar o critério, no qual serão inseridos os dados. Nesta caixa seletora, estão disponíveis os quinze critérios utilizados no MMSPF. A terceira ação corresponde a escolher o processo de fundição de metal, dentre os quinze contemplados no MMSPF, ao qual se refere aos dados a serem inseridos. A quarta ação corresponde efetivamente à inserção dos dados na forma de uma função de pertinência trapezoidal (a, b, c, d). No exemplo da Figura 18, apresentam-se os dados provenientes de Swift e Booker (2003) referentes ao peso em (kg) dos componentes a serem produzidos pelo processo de fundição sob pressão (*die casting*). A quinta ação necessária consiste em salvar a fonte de dados inserida e atualizar a base de dados. As fontes de dados utilizados no MMSPF são apresentadas no Apêndice A. As informações relativas aos critérios do grupo de impacto

ambiental foram obtidas por meio de consulta, a especialistas, na área ambiental de fundição de metais.

Para apresentar as interfaces gráficas das etapas operacionais, um exemplo de aplicação apresentado em Er e Dias (2000) foi realizado, utilizando-se o aplicativo computacional do MMSPF.

A Figura 19 apresenta o componente e a Tabela 21, as informações utilizadas no módulo de seleção técnica do exemplo realizado pelo aplicativo computacional do MMSPF.



Figura 19 – Componente automotivo utilizado na apresentação do aplicativo computacional do MMSPF

FONTE: Er e Dias (2000).

Tabela 21 – Informações do componente utilizado no exemplo realizado pelo aplicativo computacional do MMSPF

Informações do Componente	Informações
Material	Alumínio
Peso (kg)	4,5
Tamanho de lote anual (peças)	> 100.000
Maior dimensão (mm)	400
Maior espessura de seção (mm)	12
Menor espessura de seção (mm)	2,5
Rugosidade Superficial Máxima (mm) Ra	8
Ângulo de extração mínimo (graus)	Não informado
Tolerância dimensional (mm)	$\pm 1,0$

FONTE: Er e Dias (2000).

A Figura 20 apresenta a interface gráfica da etapa operacional de separação inicial.

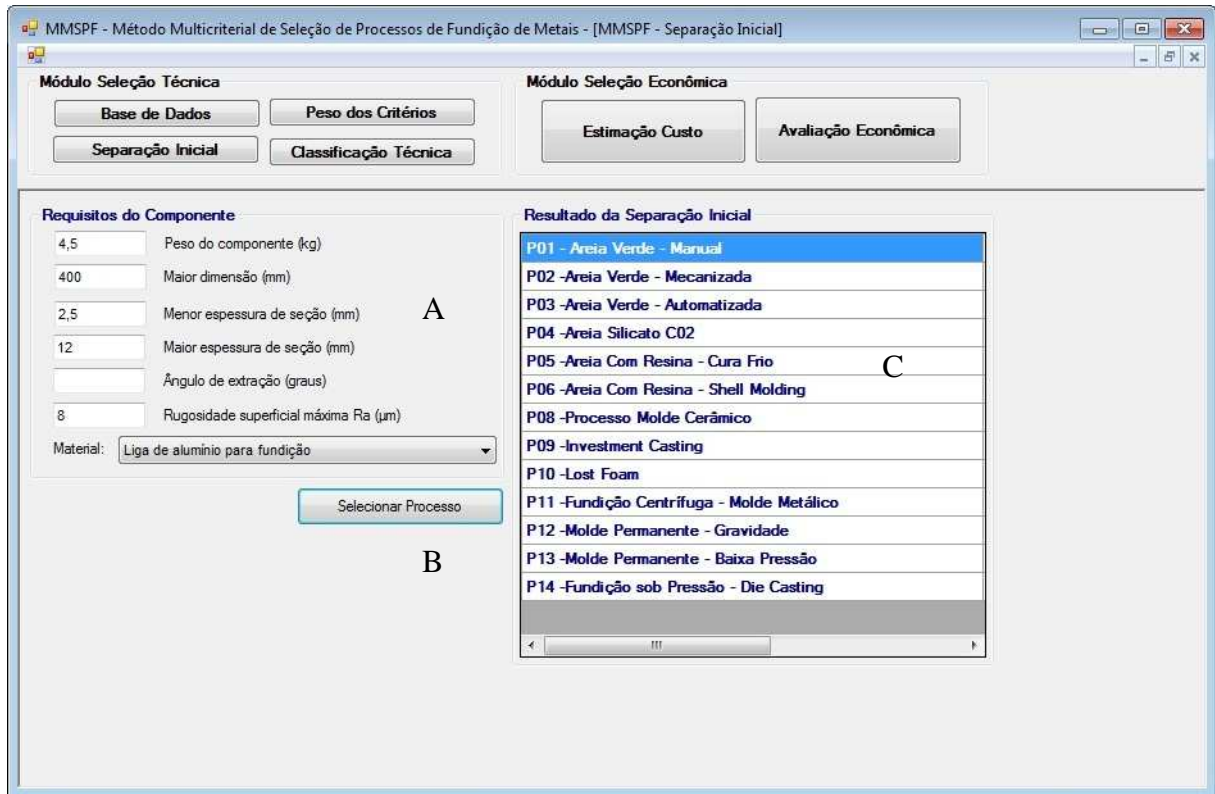


Figura 20 - Interface gráfica da etapa operacional de separação inicial, com as informações do componente à esquerda e os resultados apresentados à direita

FONTE: Autor.

Na esquerda da interface gráfica, (posição A) são disponibilizados os campos para inserção dos valores dos sete critérios utilizados na separação inicial. Após a inserção das informações do componente em análise (Tabela 21), o botão selecionar processo é acionado. Os resultados dos processos classificados são apresentados na posição C. Treze processos foram selecionados como aptos para produzirem o componente da Figura 19. Apenas os processos de moldagem em gesso (*plaster molding*) e *squeeze casting* foram eliminados nesta etapa. Deve-se observar que nem todos os campos precisam ser preenchidos para executar o processo de separação. Mas, quanto maior o número de informações, mais preciso é o processo de separação.

A próxima etapa operacional a ser executada é a determinação do peso dos critérios. O usuário é o responsável por determinar o peso dos critérios, de acordo com as necessidades demandadas, dependendo do tipo de aplicação do componente em análise. O método AHP é utilizado na determinação dos pesos, conforme descrito em 3.2.4. Os julgamentos são operacionalizados por meio de escolha na caixa de seleção, da opção correspondente à decisão do usuário (Posição A). Ao final da realização dos seis julgamentos correspondente a determinação dos pesos dos grupos dos critérios, deve-se acionar o botão *determinar pesos*

dos grupos de critérios. Caso os julgamentos realizados sejam inconsistentes, como o exemplo apresentado na Figura 21, estes devem ser refeitos.

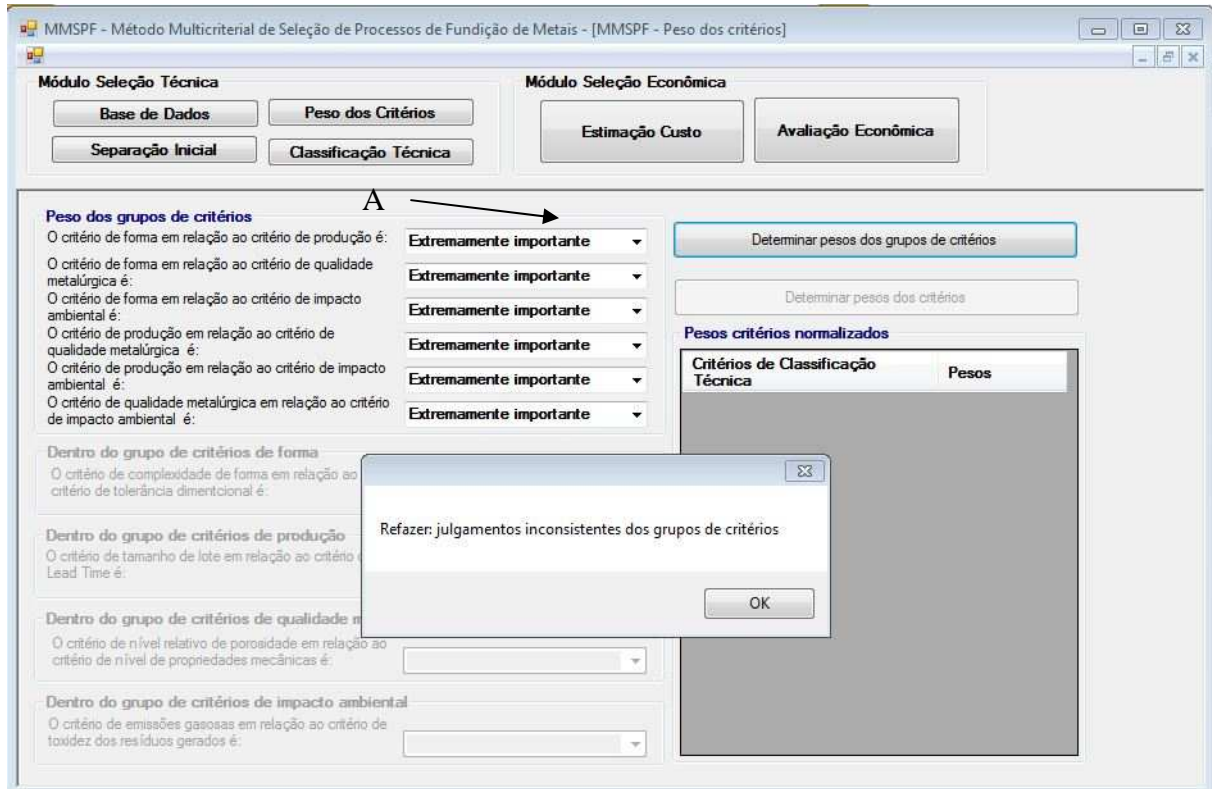


Figura 21 - Interface gráfica da etapa operacional peso dos critérios, com o aviso de julgamentos inconsistentes dos grupos de critérios acionado

FONTE: Autor.

Caso os julgamentos sejam inconsistentes, o decisor deve realizar novamente este procedimento fazendo ajustes no preenchimento

A Figura 22 apresenta a interface gráfica do usuário com o botão *determinar pesos dos grupos de critérios* acionado, e com julgamentos dos grupos de critérios consistentes.

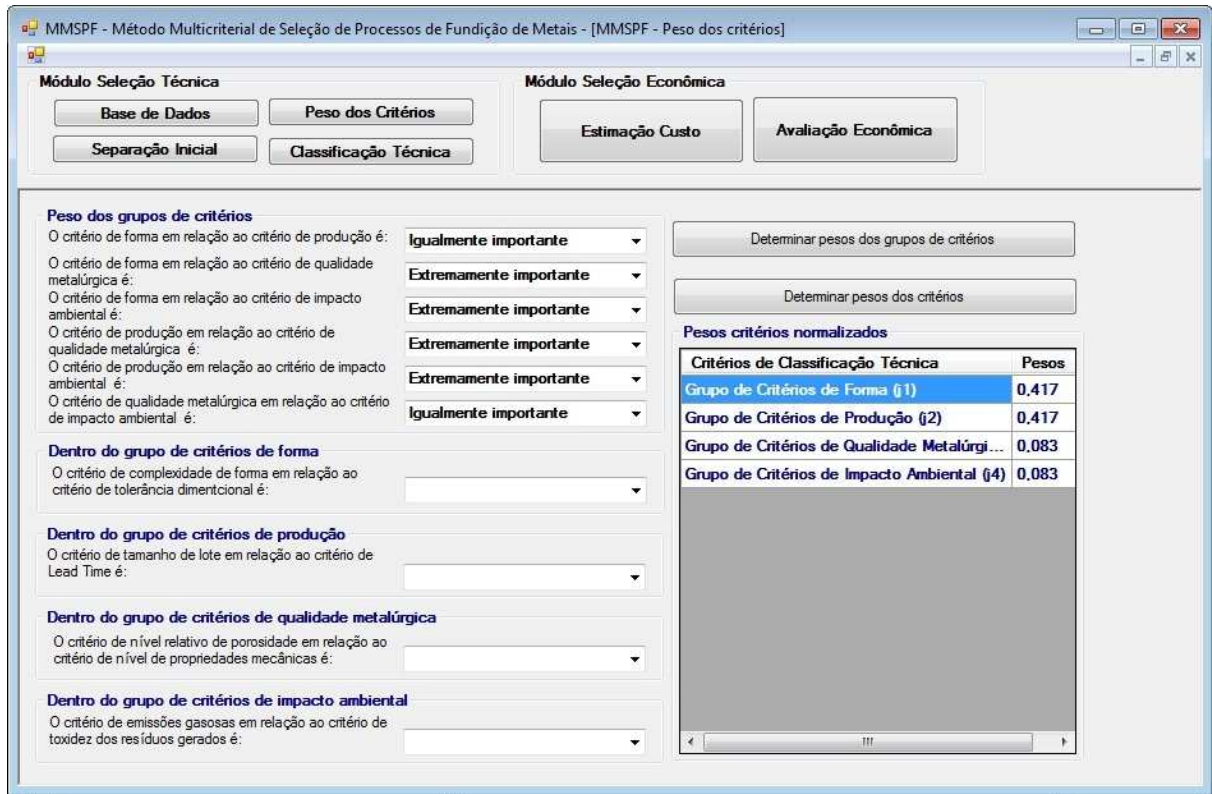


Figura 22 - Interface gráfica da etapa operacional dos pesos dos grupos de critérios, com o resultado dos julgamentos consistente

FONTE: Autor.

Com os pesos dos grupos dos critérios determinados, realiza-se a última ação desta etapa operacional, que consiste na determinação do peso dos critérios dentro de cada um dos grupos. Nesta etapa, os julgamentos são realizados dentro do grupo de critérios, sendo necessária apenas uma comparação pareada, dentro de cada grupo para se obter o resultado. Na realização destes julgamentos não existe problema em relação à consistência, pois apenas um julgamento é realizado dentro de cada grupo, pois há apenas dois critérios em cada grupo. A Figura 23 apresenta o resultado final desta etapa operacional.



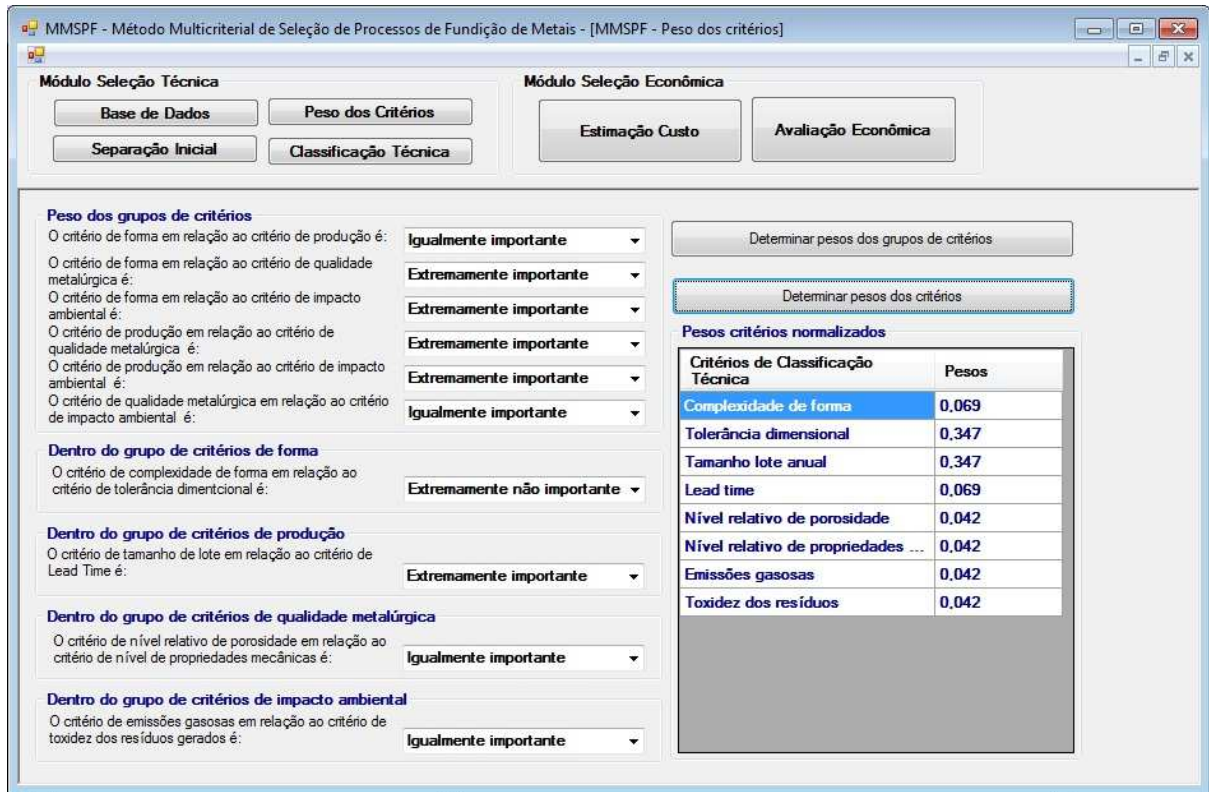


Figura 23 - Interface gráfica da etapa operacional peso dos critérios, com o resultado de todos os pesos dos critérios determinados

FONTE: Autor.

Com os pesos determinados, realiza-se a etapa operacional de classificação técnica. As informações utilizadas nesta etapa são: (i) a complexidade de forma do componente em análise, com duas opções de seleção: baixa ou alta; (ii) o tamanho do lote anual a ser produzido e (iii) a tolerância dimensional para o componente; (iv) *lead time* para produção da primeira amostra. Os outros quatro critérios utilizados na classificação técnica são avaliados conforme as preferências expressas pelo projetista do componente por meio dos pesos dos critérios. O MMSPF considera que nível relativo de propriedades mecânicas e porosidade, emissões gasosas e toxidez dos resíduos, são características intrínsecas dos processos de fundição de metais, e não são alteradas em função do componente a ser produzido no processo. O efeito destes critérios na classificação técnica é função da importância atribuída a eles por meio dos pesos. A Figura 24 apresenta o resultado da classificação técnica para o componente em análise.

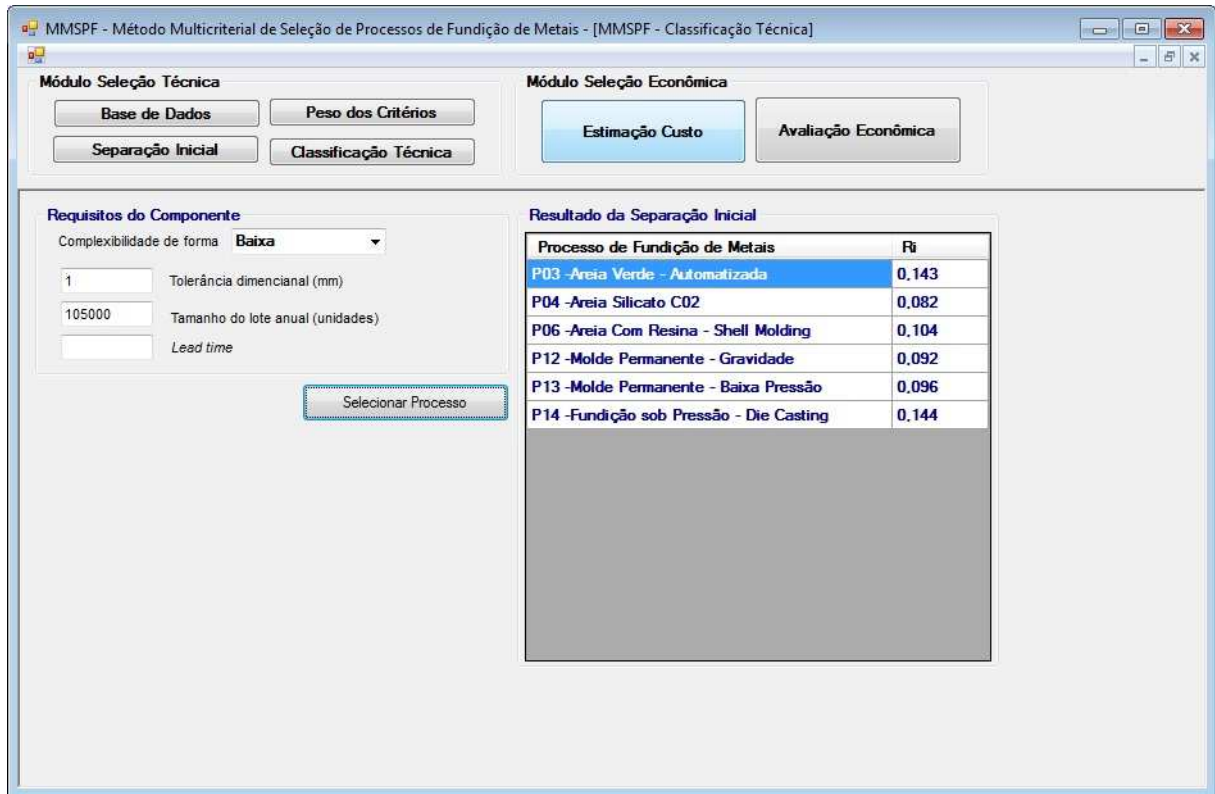


Figura 24 - Interface gráfica da etapa operacional de classificação técnica, com o resultado  
 FONTE: Autor.

Dos treze processos aprovados, na etapa de separação inicial, apenas seis foram selecionados na etapa de classificação por apresentarem compatibilidade técnica na produção do componente da Figura 19. Os processos classificados e seus respectivos índices de classificação técnica são: (i) fundição sob pressão - *die casting* (0,144); (ii) areia verde automatizada (0,143); (iii) areia com resina - *shell molding* (0,104); (iv) molde permanente - baixa pressão (0,096); (v) molde permanente - gravidade (0,092); (vi) areia silicato - CO<sub>2</sub> (0,082).

Como o módulo de seleção técnica apresentou seis possíveis processos para fabricar o componente em análise, é necessário utilizar o módulo de seleção econômica para concluir a seleção do processo de fundição de metais, mais apropriado à fabricação do componente apresentado na Figura 19.

A primeira etapa operacional do módulo de seleção econômica é a estimativa de custo. A Figura 25 apresenta a interface gráfica desta etapa.



**MMSPF - Método Multicriterial de Seleção de Processos de Fundição de Metais - [MMSPF - Estimação Custo]**

**Módulo Seleção Técnica**

Base de Dados    Peso dos Critérios

Separação Inicial    Classificação Técnica

**Módulo Seleção Econômica**

Estimação Custo    Avaliação Econômica

**Custos base**

A: Custo base molde (Areia Verde R\$/kg): 0,08424

B: Custo base energia (R\$/kWh): 0,14392

C: Custo base processamento (R\$/kg): 0,36100

**Coeficientes de adequação de custo**

Processo	CMDAF	CMDFF	CMDLA	CMDLC	CMDLM	CMDLZ
Areia Verde - Manual	1,0616	1,0505	1,0556	1,0365	1,0687	0,0000
Areia Verde - Mecanizada	1,0616	1,0505	1,0556	1,0365	1,0687	0,0000
Areia Verde - Automatizada	1,0512	1,0401	1,0452	1,0263	1,0582	0,0000
Areia Silicato - CO2	1,0616	1,0505	1,0556	1,0365	1,0687	1,0606
Areia com Resina - Cura frio	1,0616	1,0505	1,0556	1,0365	1,0687	1,0606
Areia com Resina - Shell Molding	1,0564	1,0453	1,0504	1,0314	0,0000	0,0000
Processo Molde de Gesso	0,0000	0,0000	1,0504	1,0314	1,0634	1,0553
Processo Molde Cerâmico	1,0564	1,0453	1,0504	1,0314	1,0634	1,0553
Investment Casting	1,0564	1,0453	1,0504	1,0314	1,0634	1,0553
Molde Cheio - Lost Foam	0,0000	1,0505	1,0556	1,0365	1,0687	1,0606
Fundição Centrífuga - Molde Metálico	0,0000	0,0000	1,0556	1,0365	1,0687	1,0606
Molde Permanente - Gravidade	0,0000	1,0453	1,0504	1,0314	1,0634	1,0553
Molde Permanente - Baixa Pressão	0,0000	0,0000	1,0452	1,0263	1,0582	1,0501
Fundição sob Pressão - Die Casting	0,0000	0,0000	1,0452	1,0263	1,0582	1,0501
Squeeze Casting	0,0000	0,0000	1,0452	1,0263	1,0582	1,0501

Atualizar base de dados    Cancelar    Salvar

Figura 25 – Interface gráfica da etapa operacional de estimação de custo

FONTE: Autor.

Os dados necessários à aplicação do modelo de estimação de custo de fabricação de componentes fundidos, apresentado na equação (18), estão todos inseridos no banco de dados e podem ser visualizados por meio da interface apresentada na Figura 25. As únicas ações necessárias, nesta etapa, são a atualização dos valores dos custos base. Os procedimentos utilizados na determinação dos custos base do molde (posição A), de energia (posição B) e de processamento (posição C) são apresentados em maiores detalhes no Apêndice A, juntamente com as fontes de dados dos processos de fundição de metais. E os coeficientes utilizados na comparação dos processos são aqueles apresentados na seção 3.3.2.

Após realizar a verificação dos custos base utilizados na estimação dos custos de fabricação, a etapa final do aplicativo computacional do MMSPF é a avaliação econômica. A interface gráfica de avaliação econômica é apresentada na Figura 26.

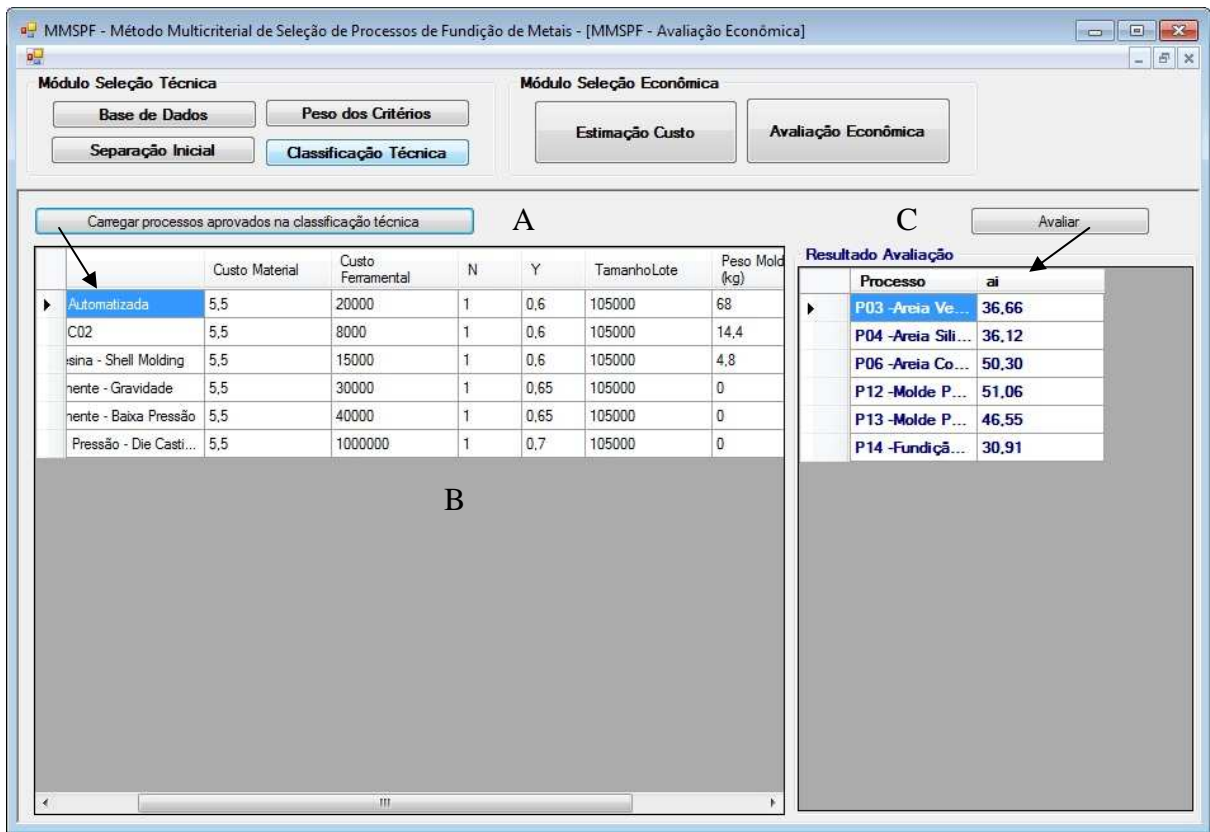


Figura 26 - Interface gráfica da etapa operacional de avaliação econômica com o resultado final da seleção do processo de fundição do componente em análise

FONTE: Autor.

A primeira ação a ser desenvolvida na avaliação econômica é carregar os processos aprovados na classificação técnica (posição A). No exemplo, foram carregados os seis processos aprovados na etapa de classificação técnica.

A segunda ação a ser desenvolvida é o preenchimento dos campos para os dados de custo do material utilizado na confecção do componente (R\$), custo do ferramental (R\$), número de modelos da ferramenta, rendimento metalúrgico, tamanho de lote, peso do molde e peso da peça. Estes campos estão disponíveis para preenchimento apenas nos processos aprovados na classificação técnica.

Ao se acionar o botão *avaliação econômica* (Posição C), os resultados da estimação do custo de fabricação  $CP_i$  em R\$/kg e o índice de mérito  $\alpha_i$  são apresentados na parte direita da interface. O processo de melhor desempenho é o de menor valor de  $\alpha_i$ , pois é o que apresenta menor custo e maior desempenho técnico, conforme equação (20).

Esta forma de disposição dos dados da interface gráfica de avaliação econômica permite a realização de diferentes simulações entre os componentes de custo de cada processo. Isto facilita a avaliação do impacto das mudanças da configuração de ferramental

sobre o resultado final do custo de fabricação de cada processo e, conseqüentemente, sobre o resultado final da seleção do processo de fundição mais adequado.

Os resultados da avaliação econômica e seus respectivos índices  $\alpha_i$  são: (i) fundição sob pressão - *die casting* (30,91); (ii) areia verde automatizada (36,66); (iii) molde permanente – baixa pressão (46,45); (iv) areia com resina – *shell molding* (50,30); (v) molde permanente - gravidade (51,06); (vi) areia silicato – CO<sub>2</sub> (66,12).

O processo de fundição sob pressão (*die casting*) foi o selecionado pelo aplicativo computacional do MMSPF como o processo de fundição de metais mais adequado para fabricar o componente exibido na Figura 19, pois apresentou o menor índice de custo relativo ao desempenho técnico  $\alpha_i$  de 30,91 R\$/kg, sendo este o mesmo resultado obtido no trabalho de Er e Dias (2000).

## **5 APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MMSPF**

Neste capítulo, apresenta-se a quarta etapa do trabalho desenvolvido nesta tese, a aplicação e a validação do MMSPF. Na seção 5.1 são descritos os componentes utilizados na aplicação do MMSPF e os parâmetros utilizados no tratamento das informações da base de dados. Nas seções 5.2 e 5.3 são apresentados os resultados da aplicação dos módulos de seleção técnica e econômica respectivamente. Na seção 5.4 são apresentados os resultados da validação do MMSPF.

### **5.1 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES E DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE INFORMAÇÃO**

A aplicação do MMSPF foi realizada por meio da utilização do aplicativo computacional descrito no capítulo 4. Para a aplicação e validação, foi contemplado um conjunto de componentes representativos da grande parte das aplicações de componentes fundidos. A descrição dos componentes a serem utilizados na aplicação do MMSPF e os parâmetros utilizados no tratamento das informações, são descritos a seguir.

#### **5.1.1 Descrição dos componentes utilizados na aplicação e dos parâmetros para o tratamento das informações**

O critério de escolha dos componentes para compor a amostra para aplicação e validação foram os fatores: tipo de liga, tamanho de lote e complexidade de forma, para garantir a representatividade da amostra. Segundo Beeley (2001), estes são os principais fatores a serem considerados na seleção de processos de fundição de metais. Nesta etapa, não foi considerado o critério ambiental, pois é uma característica intrínseca do processo de fundição e não do tipo de componente a ser fabricado. Utilizou-se um planejamento fatorial completo  $2^3$  para determinar a combinação dos três fatores dos componentes a serem analisados. A Tabela 22 apresenta o planejamento fatorial com a descrição dos componentes para o desenvolvimento da aplicação do MMSPF.

Tabela 22 – Caracterização dos componentes para aplicação do MMSPF

Caso	Fatores			Descrição da combinação de fatores do componente		
	F1	F2	F3			
1	-	-	-	Baixo volume de produção (-)	Liga não ferrosa	Baixa complexidade (-)
2	-	-	+		(-)	Alta complexidade (+)
3	-	+	-		Liga ferrosa	Baixa complexidade (-)
4	-	+	+		(+)	Alta complexidade (+)
5	+	-	-	Alto volume de produção (+)	Liga não ferrosa	Baixa complexidade (-)
6	+	-	+		(-)	Alta complexidade (+)
7	+	+	-		Liga ferrosa	Baixa complexidade (-)
8	+	+	+		(+)	Alta complexidade (+)

FONTE: Autor.

Os componentes, com as características definidas no planejamento fatorial apresentado na Tabela 22, foram selecionados a partir de livros, artigos, componentes fundidos e catálogos técnicos, ou seja, a partir de um conjunto de componentes produzidos por processos de fundição de metais. Este procedimento de escolha dos componentes é semelhante ao adotado por Karthik *et al.* (2003) na aplicação do método de seleção de processos de fundição de metais, proposto por estes autores. Os principais requisitos dos componentes são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Informações dos componentes utilizados na aplicação do MMSPF

Requisitos dos componentes	Componentes de aplicação							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Tipo de liga	LA	LC	AF	FF	LZ	LA	FF	FF
Peso (kg)	2,35	6,70	10,7	16,3	2,45	3,5	0,40	11,2
Maior dimensão (mm)	672	230	284	262,5	80	800	105	220
Maior espessura de seção (mm)	20	17	27	16	22	24	10	22
Menor espessura de seção (mm)	8	6	6,5	5,5	7,5	4	5	7,7
Rugosidade Máxima ( $\mu\text{m}$ ) Ra	NI	3,2	NI	NI	1,6	6	NI	NI
Ângulo de extração mínimo (graus)	1,5	1,5	1,5	NI	0,5	NI	NI	1
Tamanho de lote anual (peças)	320	600	750	400	15.000	50.000	80.000	12.000
Tolerância dimensional (mm)	$\pm 1,5$	$\pm 1,2$	$\pm 1,5$	NI	$\pm 0,5$	$\pm 2,0$	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$
Lead time	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI	NI
Complexidade de forma	baixa	alta	baixa	alta	baixa	alta	baixa	alta

FONTE: Autor.

As informações apresentadas na Tabela 23 são relacionadas com os critérios avaliados pelo MMSPF. Mesmo componentes sem todas as informações, como o componente quatro podem ser analisados pelo MMSPF.

Como foi discutido na seção 3.1, o escopo de aplicação do MMSPF é o estágio inicial do desenvolvimento de novos produtos. Nesta fase, é que surgem os conceitos básicos a serem desenvolvidos para transformar as necessidades do mercado, em uma especificação de produto. Estes conceitos são expressos na forma de informação, como as da Tabela 23 e, com

auxílio do MMSPF, estas diferentes propostas de desenvolvimento podem ser testadas em relação aos aspectos técnicos e econômicos dos processos de fundição de metais.

Os parâmetros utilizados na aplicação do MMSPF são importâncias relativas iguais para todas as fontes de informações e um parâmetro de decisão com valor um ( $\rho = 1,0$ ), caracterizando uma decisão imparcial em relação ao conjunto de fontes de informação tratadas.

## 5.2 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÓDULO DE SELEÇÃO TÉCNICA DO MMSPF

Nesta seção, são apresentados os resultados da aplicação do MMSPF para os oito componentes apresentados na seção 5.1.1.

### 5.2.1 Resultados da Etapa de Separação Inicial

As informações dos componentes de aplicação, necessárias ao desenvolvimento da etapa de separação inicial, foram inseridas pela ordem de apresentação no aplicativo do MMSPF. Este procedimento foi realizado para se determinar o número de processos de fundição de metais eliminados por cada um dos critérios de separação. A Tabela 24 apresenta o número de processos de fundição de metais, eliminados conforme o critério de separação para cada um dos oito componentes.

Tabela 24 - Número de processos eliminados conforme critério de separação para cada componente de aplicação

Critérios de separação inicial	Componentes de aplicação								Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	
C1 Peso (kg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C2 Maior dimensão (mm)	3	0	0	0	0	3	0	0	6
C3 Maior espessura de seção (mm)	1	0	1	0	1	1	0	0	4
C4 Menor espessura de seção (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C5 Ângulo de extração mínimo (graus)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C6 Rugosidade Máxima ( $\mu\text{m}$ ) Ra	0	0	0	0	1	0	0	0	1
C7 Tipo de liga	0	0	7	5	4	0	5	5	26

FONTE: Autor.

Os critérios de separação: ângulo de extração mínimo, menor espessura de seção e peso, não eliminaram nenhum processo de fundição. Conclui-se que os valores apresentados para estes critérios, para os componentes de aplicação, encontram-se dentro das faixas usuais para os processos de fundição contemplados no MMSPF. Isto se deve ao fato de que os

componentes escolhidos para aplicação do MMSPF foram obtidos a partir de um conjunto de componentes, produzidos por fundição, e, portanto os valores destes critérios já estão adequados aos processos de fundição, como demonstrou o MMSPF.

Os critérios de rugosidade máxima, maior espessura de seção e maior dimensão eliminaram, respectivamente, um, quatro e seis processos de fundição de metais. Deve-se observar que, com o procedimento de agregação de informação utilizado no MMSPF, a eliminação é o resultado do consenso de todas as fontes de informação, para o critério em análise. Neste tipo de situação, é que se observa a importância da etapa de tratamento das informações para aumentar a confiabilidade da tomada de decisão na etapa de separação inicial.

O tipo de liga utilizado na confecção do componente foi o mais discriminante dos critérios de separação inicial, eliminando vinte e seis processos de fundição. Segundo Lenau (1996), Lovatt e Shercliff (1998a) e Ashby e Schimt (2007), existe uma forte interação entre material (tipo de liga) e seleção de processos de fabricação. Os resultados apresentados pelo MMSPF, para a etapa de separação inicial, confirmam a importância deste efeito.

O resultado da etapa de separação inicial, fornecido pelo aplicativo computacional do MMSPF, com base nas fontes de informações apresentadas no apêndice A, e com os parâmetros de decisão determinados na seção 5.1.2, é apresentado no Quadro 4, assim como o número do critério responsável pela eliminação dos mesmos.

Quadro 4 – Resultados da etapa de separação inicial do MMSPF para os oito componentes com os critérios responsáveis pela eliminação

Processos de fundição de metais			Componentes de aplicação							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	P1	Areia Verde – Manual					C7			
	P2	Areia Verde – Mecanizada					C7			
	P3	Areia Verde – Automatizada					C7			
	P4	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>					C5			
	P5	Areia com Resina – Cura frio					C5			
	P6	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>					C7			
2	P7	Processo Molde de Gesso			C7	C7			C7	C7
	P8	Processo Molde Cerâmico			C3			C2		
3	P9	<i>Investment Casting</i>	C2					C2		
	P10	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>	C2		C7					
4	P11	Fundição Centrífuga - Molde Metálico			C7	C7	C6		C7	C7
	P12	Molde Permanente - Gravidade			C7		C5			
	P13	Molde Permanente - Baixa Pressão			C7	C7	C5		C7	C7
	P14	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>	C3		C7	C7	C3	C3	C7	C7
	P15	<i>Squeeze Casting</i>	C2		C7	C7		C2	C7	C7

FONTE: Autor.

Para orientar a discussão a respeito da etapa de separação inicial, os quinze processos de fundição de metais contemplados pelo MMSPF foram separados em quatro grupos distintos.

Os processos de fundição de metais do grupo 1, que utilizam areia na confecção do molde e modelo permanente (P1 a P6) foram selecionados para fabricar sete, entre os oito componentes em análise. Foram desqualificados apenas para a fabricação do componente de aplicação cinco, em função do tipo de liga (P1, P2, P3 e P6) e ângulo de extração mínimo (P4 e P5). Este bom desempenho dos processos de fundição em areia deve-se a enorme liberdade de concepção em termos de tamanho, geometria e qualidade dos componentes fundidos obtidos (O'MEARA *et al.*, 1988; PIWONKA, 1988).

O que ocorre com o processo P7 de molde em gesso (*plaster molding*) é a limitação de tipo de liga imposta pelo MMSPF, referenciada pelo autor Boljanovic (2009), em que este tipo de processo não se aplica a ligas ferrosas. Portanto, este processo foi apto a produzir apenas quatro dos oito componentes em estudo. Processos, que utilizam lama refratária na confecção do molde (P8 e P9), foram os processos em segundo lugar em termos de versatilidade de forma, considerados aptos a produzir seis componentes dos oito em análise. Nestes processos, não existe limitação de tipo de liga, sendo que a principal limitação foi em relação a maior dimensão e ao máximo tamanho da seção. Estas limitações são descritas nas fontes de informação utilizadas para avaliar estes processos.

Situação diferente ocorre com o processo P10, molde cheio (*lost foam*), o qual não foi considerado apto a produzir o componente três, confeccionado em liga de aço. De acordo com Brown (2000), este processo não é adequado à produção de aços fundidos de baixo carbono. Mas, é adequado à produção de outros tipos de aço, como aços de alto carbono. Como o MMSPF não define o tipo de liga específica (alto ou baixo carbono), o MMSPF pode cometer um erro quando classifica este processo como apto a produzir o componente ou outro tipo de erro se o desclassifica. De acordo com O'Keefe *et al.* (1987), os dois tipos de erro, associados a sistemas especialistas ou sistemas inteligentes, são: erro do tipo I, ou risco do criador do sistema (*builder's risk*), e erro tipo II, ou risco do usuário dos sistema (*user's risk*). Ainda de acordo com O'Keefe *et al.* (1987), o erro tipo I causa aumento dos custos de desenvolvimento; Mas, os erros do tipo II podem trazer consequências mais graves em função da aplicação, e portanto devem ser minimizados. Como na seleção de processos de fundição de metais existe um conjunto de quinze processos, a eliminação de alguns processos não é tão crítica ao resultado final da seleção, pois existem outros capazes de produzir o componente em análise. No desenvolvimento do MMSPF, foi escolhido incorrer em erros do tipo I a fim de minimizar ao máximo o erro do tipo II.



Processos que utilizam molde metálico (P11, P12, P13, P14 e P15) foram os menos versáteis, considerando-se o número de componentes que podem ser produzidos por estes processos. O menos versátil é o P14, fundição sob pressão (*die casting*). Este processo foi eliminado pelo critério tipo de liga em quatro componentes (não é compatível com ligas ferrosas) e maior espessura de seção em três componentes (mais apropriado para peças finas). De acordo com Jorstad (2008), este processo é o responsável pela produção de 19% da produção mundial de fundidos, só perdendo para os processos que utilizam areia na confecção do molde. Portanto, com a desclassificação do P14 em sete dos oito componentes pode parecer que o MMSPF não apresentou a solução correta. Porém, deve-se observar nos componentes 1, 5 e 6, eliminados pela maior espessura de seção, que a proporção entre a maior e a menor espessura de seção é da ordem de 2,5, 2,93 e 6, respectivamente. Esses componentes possuem uma variação na espessura de seção muito acentuada, o que não é adequado para moldes metálicos, nos quais as paredes devem ser o mais homogêneas em termos de espessura, para que o resfriamento seja uniforme, e, de preferência, de paredes finas, para que o resfriamento seja rápido, reduzindo-se o ciclo de processamento e aumentando a produtividade (LIU *et al.*, 2007). Do grupo de processos de molde metálico, considerando-se o conjunto de componentes utilizados na aplicação, o mais versátil é o P12, molde permanente por gravidade.

A etapa de separação inicial é uma etapa intermediária do módulo de seleção técnica. Com base nos resultados dos componentes de aplicação dois e cinco, os quais apresentaram o menor e o maior número de processos eliminados, respectivamente, pode-se constatar que a etapa de separação inicial atingiu os seus objetivos. Em relação ao componente dois, as suas especificações permitem um grande número de opções de processos de fundição de metais, sendo que o MMSPF não eliminou nenhum processo de fundição de metal que consta da sua base de dados. Em relação ao componente cinco, o grande número de processos eliminados pelo MMSPF, nesta etapa, demonstra que se trata de um componente com especificações mais rígidas. Uma possibilidade em relação a este componente seria verificar se as especificações são todas essenciais, ou se podem ser alteradas para permitir um número maior de opções de processos de fundição de metais.

### 5.2.2 Resultados da Etapa de Classificação Técnica

No desenvolvimento da etapa de classificação técnica é necessário determinar os pesos dos critérios próprios dessa etapa. Os pesos dos critérios devem ser determinados conforme

sua importância para o desenvolvimento do componente em análise. Segundo Kahraman (2008), um dos aspectos que caracterizam a decisão multicritério discreta é a utilização de informações adicionais do tomador de decisão para se chegar à solução do problema em análise. Uma das grandes contribuições do MMSPF é possuir um sistema para determinação dos pesos dos critérios de classificação estruturado com base no método AHP. A análise é realizada, inicialmente, para se determinar o peso dos grupos dos critérios de forma, produção e qualidade metalúrgica e impacto ambiental. Em função da aplicação, o projetista pode priorizar o grupo de critério adequado. Após a determinação do peso do grupo dos critérios, determina-se o peso dentro de cada um dos grupos, avaliando-se qual dos dois critérios existentes em cada grupo é o mais importante para o componente em análise.

No desenvolvimento da aplicação do MMSPF é necessário simular as diferentes preferências do decisor, em relação aos componentes de aplicação. Para verificar o efeito dos pesos dos critérios sobre o resultado da classificação técnica, foram gerados vários cenários através de um planejamento fatorial de  $2^4$ ; em que o nível alto corresponde à opção extremamente importante e o nível baixo corresponde à opção extremamente não importante. Para os 16 cenários gerados, realizaram-se o preenchimento das 6 comparações pareadas entre os 4 grupos de critérios ( $n.(n-1)/2 = 6$ ), seguindo uma lógica: quando o sinal do primeiro critério era positivo e o do segundo, negativo, preenchia-se a matriz AHP com a opção extremamente importante e vice-versa; quando o sinal do primeiro critério era igual ao do segundo, preenchia-se a opção igualmente importante. Com o preenchimento realizado segundo esta lógica, a matriz AHP preenchida fica consistente, não acrescentando uma dificuldade adicional na etapa de aplicação e validação do MMSPF.

Posteriormente, dentro dos grupos de critérios, adotou-se sempre os mesmos julgamentos, quais sejam: no grupo de forma, o critério complexidade de forma em relação à tolerância dimensional, sendo extremamente não importante; no grupo produção, o tamanho de lote em relação *lead time*, sendo extremamente importante; no grupo qualidade metalúrgica, o nível relativo de porosidade em relação ao nível relativo de propriedades mecânicas, sendo igualmente importante e no grupo impacto ambiental, o critério de emissões gasosas em relação ao critério de toxidez dos resíduos, sendo igualmente importante. O Quadro 5 apresenta a importância de cada grupo de critério e os respectivos pesos dos critérios de classificação técnica, obtidos a partir do preenchimento dos julgamentos para os diferentes cenários.

Quadro 5 – Peso dos critérios para os diferentes cenários

Cenário	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\omega_6$	$\omega_7$	$\omega_8$
1	+	-	-	-	0,104	0,521	0,104	0,021	0,063	0,063	0,063	0,063
2	+	-	-	+	0,069	0,347	0,069	0,014	0,042	0,042	0,208	0,208
3	+	-	+	-	0,069	0,347	0,069	0,014	0,208	0,208	0,042	0,042
4	+	-	+	+	0,052	0,260	0,052	0,010	0,156	0,156	0,156	0,156
5	+	+	-	-	0,069	0,347	0,347	0,069	0,042	0,042	0,042	0,042
6	+	+	-	+	0,052	0,260	0,260	0,052	0,031	0,031	0,156	0,156
7	+	+	+	-	0,052	0,260	0,260	0,052	0,156	0,156	0,031	0,031
8	+	+	+	+	0,042	0,208	0,208	0,042	0,125	0,125	0,125	0,125
9	-	-	-	-	0,042	0,208	0,208	0,042	0,125	0,125	0,125	0,125
10	-	-	-	+	0,021	0,104	0,104	0,021	0,063	0,063	0,313	0,313
11	-	-	+	-	0,021	0,104	0,104	0,021	0,313	0,313	0,063	0,063
12	-	-	+	+	0,014	0,069	0,069	0,014	0,208	0,208	0,208	0,208
13	-	+	-	-	0,021	0,104	0,521	0,104	0,063	0,063	0,063	0,063
14	-	+	-	+	0,014	0,069	0,347	0,069	0,042	0,042	0,208	0,208
15	-	+	+	-	0,014	0,069	0,347	0,069	0,208	0,208	0,042	0,042
16	-	+	+	+	0,010	0,052	0,260	0,052	0,156	0,156	0,156	0,156

FONTE: Autor.

Com os pesos dos dezesseis cenários, apresentados no Quadro 5, e as informações dos oito componentes para aplicação, apresentadas na Tabela 23, realizou-se a aplicação da etapa de classificação técnica do MMSPF para 128 (8\*16) situações.

O Quadro 6 apresenta os resultados dos processos de fundição de metais ordenados, conforme o índice de classificação obtido para cada processo. O resultado completo com os respectivos valores do índice  $R_i$ , para cada um dos oito componentes e para os dezesseis cenários, são apresentados no Apêndice B.

Quadro 6 - Resultados da classificação técnica em função da variação dos pesos dos critérios

Cenário	Componentes de aplicação							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	{P4, P2, P5, P3, P1}	{P4, P5, P2, P3, P6}	{P4, P2, P3, P5}	{P8, P9, P4, P2, P1}	{P15, P8}	{P4, P3, P5, P2, P1}	{P12, P3, P4, P5, P6, P8}	{P4, P3, P5, P6, P2, P12}
2	{P2, P4, P3, P1, P5}	{P4, P3, P2, P5, P12, P6, P13, P1}	{P2, P3, P4, P1}	{P8, P12, P2, P1, P9, P3, P4}	{P15, P8, P7}	{P3, P4, P2, P1, P5}	{P12, P3, P4, P8}	{P3, P4, P2, P12}
3	{P4, P2, P5, P3, P11}	{P4, P15, P5, P6, P2, P3, P11, P12, P8, P13}	{P4, P2, P3, P5}	{P8, P12, P9,}	{P15, P8}	{P4, P3, P5, P2, P1, P11}	{P12, P8, P6, P3, P4, P5}	{P12, P6, P4, P3, P8, P5, P2}

Continua

Quadro 6 - continuação

Cenário	Componentes de aplicação							
	1	2	3	4	5	6	7	8
4	{P2, P4, P3, P11, P12, P8, P13}	{P15, P4, P3, P2, P11, P12, P13, P8}	{P2, P3, P4, P1}	{P8, P12, P9, P2, P3, P1}	{P15, P8}	{P3, P4, P2, P11, P1}	{P12, P8, P3, P4}	{P12, P3, P8, P4, P2}
5	{P2, P5, P1, P3, P4}	{P4, P5, P2, P6, P3, P8, P11, P1, P9}	{P4, P5, P2}	{P8, P9, P4, P2, P5, P1}	{P15, P10}	{P4, P3, P5, P2, P1}	{P3, P4, P12, P5, P6}	{P3, P4, P5, P6, P2, P12}
6	{P2, P4, P5, P1, P3, P8}	{P4, P2, P5, P3, P11, P8, P1, P9}	{P2, P4, P3}	{P8, P2, P9, P4, P1}	{P15}	{P3, P4, P2, P5, P1}	{P3, P12, P4, P5}	{P3, P4, P2, P12, P6, P5}
7	{P4, P2, P5, P8, P1, P3}	{P4, P5, P2, P11, P8, P6, P3, P15}	{P4, P2, P5}	{P8, P9, P4, P2, P5}	{P15}	{P4, P3, P5, P2, P1}	{P12, P3, P4, P5, P6, P8}	{P12, P6, P4, P3, P5, P2}
8	{P2, P4, P8, P5, P1, P3, P11}	{P4, P2, P11, P8, P5, P3, P15}	{P2, P4, P3}	{P8, P9, P2, P4, P12, P1}	{P15}	{P3, P4, P2, P5, P12, P1, P13}	{P12, P3, P4, P8}	{P12, P3, P4, P2, P6}
9	{P2, P4, P8, P5, P1, P3, P11}	{P4, P2, P11, P8, P5, P3, P15}	{P2, P4, P3}	{P8, P9, P2, P4, P12, P1}	{P15}	{P3, P4, P2, P5, P12, P1, P13}	{P12, P3, P4, P8}	{P12, P3, P4, P2, P6}
10	{P2, P11, P8, P3, P4, P1, P12, P13}	{P11, P2, P8, P4, P12, P3, P15, P13, P1}	{P2, P3, P4, P1, P9}	{P8, P12, P2, P1, P3, P9, P4}	{P15, P8}	{P3, P12, P13, P2, P11, P4, P1}	{P12, P3, P8, P4, P2, P1}	{P12, P3, P2, P4, P8, P1}
11	{P11, P8, P12, P13}	{P15, P11, P8, P12, P13}	{P2, P6, P4, P9}	{P8, P12, P9,}	{P15, P8}	{P11, P12, P13, P8}	{P12, P8, P6, P3}	{P12, P8, P6}
12	{P11, P8, P12, P13, P2}	{P15, P11, P8, P12, P13, P14, P2}	{P2, P3, P4, P9, P1}	{P8, P12, P2, P9, P3, P1}	{P15, P8}	{P11, P12, P13, P8, P3}	{P12, P8, P3, P4}	{P12, P8, P3, P2, P4}
13	{P2, P4, P5, P8, P1}	{P4, P2, P11, P5, P8, P9, P1}	{P2, P4, P9, P5}	{P8, P9, P2, P4, P5, P1}	{P15, P10}	{P4, P3, P5, P12, P13, P2}	{P3, P4, P12, P5, P6}	{P12, P3, P4, P2, P6, P5}
14	{P2, P4, P8, P1, P11}	{P11, P2, P4, P8, P9, P1, P5}	{P2, P4, P9, P1}	{P8, P2, P9, P4, P1}	{P15, P10}	{P3, P12, P13, P4, P2}	{P3, P12, P4}	{P12, P3, P2, P4}
15	{P8, P11, P2, P4, P5, P1}	{P11, P8, P15, P4, P2, P5, P9}	{P2, P4, P9, P5}	{P8, P9, P4, P2, P5}	{P15, P10}	{P12, P13, P3, P4, P11, P5}	{P12, P3, P4, P5, P8, P6}	{P12, P6, P3, P4, P2, P8}
16	{P8, P11, P2, P4, P1}	{P11, P8, P15, P2, P4, P9}	{P2, P4, P9}	{P8, P2, P9, P12, P4, P1}	{P15}	{P12, P13, P3, P11, P4}	{P12, P3, P4, P8}	{P12, P3, P2, P4, P8}

FONTE: Autor.

A classificação técnica do MMSPF é realizada com base em oito critérios, mas apenas quatro são diretamente relacionadas com as características do componente em análise. Os outros quatro critérios, utilizados na classificação, são características intrínsecas dos processos de fundição de metais, as quais não se alteram independentemente do componente a ser produzido no processo. A existência de um procedimento formalizado para que o decisor atribua peso aos oito critérios de classificação técnica, permite que os resultados da ordenação dos processos sejam diferentes em função das preferências do decisor. Esta característica do MMSPF é evidenciada pelos resultados apresentados no Quadro 6, no qual se observa a mudança da ordenação dos processos para os diferentes cenários, demonstrando a sensibilidade do MMSPF em relação às preferências do decisor.

Com a finalidade de se avaliar a compatibilidade técnica dos processos de fundição de metais contemplados no MMSPF em relação aos oito componentes de aplicação realizou-se o cálculo dos somatórios dos  $R_i$  para cada um dos quinze processos de fundição de metais, independente dos diferentes cenários e dos componentes de aplicação, e o número de vezes que o processo foi indicado pelo MMSPF, os quais são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Compatibilidade técnica dos processos de fundição de metais em relação aos componentes de aplicação

	<b>Processos de fundição de metais</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>Número de indicações</b>
P4	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>	12,41	100
P2	Areia Verde – Mecanizada	10,73	88
P3	Areia Verde – Automatizada	9,48	79
P8	Processo Molde Cerâmico	8,93	70
P12	Molde Permanente - Gravidade	7,36	60
P15	<i>Squeeze Casting</i>	6,23	26
P5	Areia com Resina – Cura frio	6,11	54
P1	Areia Verde – Manual	4,97	47
P9	<i>Investment Casting</i>	3,36	29
P11	Fundição Centrífuga - Molde Metálico	3,11	31
P6	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>	2,45	23
P13	Molde Permanente - baixa pressão	1,82	19
P10	Molde Cheio - <i>lost foam</i>	0,95	4
P7	Processo Molde de Gesso – <i>plaster molding</i>	0,20	1
P14	Fundição sob Pressão - <i>die casting</i>	0,07	1

FONTE: Autor.

Como se pode verificar na Tabela 25, o processo com maior versatilidade em relação aos componentes de aplicação é o processo areia silicato - CO<sub>2</sub> (P4). Este processo apresentou o maior valor acumulado de índice de classificação técnica e o maior número de indicações de todos os processos contemplados no MMSPF, 100 em 128. As principais razões que

justificam o alto desempenho do processo areia silicato - CO<sub>2</sub> estão relacionadas com a flexibilidade em relação ao grupo de critérios de forma, produção e impacto ambiental. Em relação à forma e à produção, este processo apresenta todas as vantagens inerentes aos processos de areia aglomerada com resina. Quanto ao impacto ambiental, o processo silicato-CO<sub>2</sub>, apresenta-se como o de melhor desempenho em termos de emissões gasosas em relação aos processos que utilizam areia aglomerada (*Environmental Protection Agency*, 2008). Os resíduos são inorgânicos e a reciclagem da areia é facilitada. (LAFAY, 2009). Com a utilização de critérios ambientais para se desenvolver a classificação técnica, este processo é destacado pelo MMSPF como o processo de maior versatilidade para fabricar os componentes de aplicação.

Os processos de areia verde com moldagem mecanizada (P2) e automatizada (P3) obtiveram respectivamente a segunda e a terceira colocação, em termos de compatibilidade técnica. Enquanto o processo areia verde – manual (P1), ficou apenas com a oitava colocação considerando-se o valor acumulado do índice de classificação técnica. O grupo de critério de impacto ambiental não justifica a diferença de preferência expressa pelo MMSPF. Esta preferência do MMSPF pelos processos de areia verde mecanizada e automatizada se deve ao melhor desempenho destes processos, em relação aos critérios de tamanho de lote e tolerância dimensional. Outra razão para a grande versatilidade destes processos, em relação aos componentes de aplicação, é apresentada por Jorstad (2008). Segundo este autor, os processos que utilizam areia verde possuem grande utilização em virtude de serem os processos dominantes na produção de aços e ferros fundidos. Como quatro dos componentes de aplicação são produzidos nestas ligas, são justificativas adicionais para o segundo e terceiro lugares indicados pelo MMSPF.

O processo molde cerâmico (P8) é o quarto processo mais indicado pelo MMSPF. Este processo não apresenta limitação em relação ao tipo de liga que pode ser processada. Apresenta desempenho de médio a alto, em relação aos grupos de critérios de forma, produção e impacto ambiental, de acordo com as fontes de informação apresentadas no Apêndice A.

O processo molde permanente – gravidade (P12) apresenta-se como o processo de molde metálico com a maior compatibilidade, em relação aos componentes de aplicação, com valor acumulado de índice de classificação técnica de 7,36. O melhor desempenho deste processo, em relação à compatibilidade com os componentes de aplicação, deve-se ao fato de processar ligas de ferro fundido, o que lhe propicia vantagem sobre os demais processos de molde metálico, contemplados no MMSPF. Outro fator que deve ser considerado é seu

desempenho ambiental, o que o coloca à frente de processos como areia com resina – *shell molding* (2,45) e areia com resina – cura frio (6,11), os quais apresentam pior desempenho em termos de emissões e toxidez dos resíduos gerados. Este conjunto de características justifica a preferência do MMSPF por este processo de fundição de metais.

O processo *squeeze casting* (P15) apresenta-se como o sexto maior valor acumulado de índice de classificação técnica (6,23), mas apenas o décimo em número de indicações. Isto se deve, principalmente, ao componente de aplicação cinco; neste componente o processo *squeeze casting* foi indicado como opção em todos os dezesseis cenários de peso. Segundo Vinarcik (2003), este é um dos processos destinados a produção de componentes fundidos de alta integridade (baixa porosidade) e alto desempenho em relação a propriedades mecânicas. Mas não é um processo muito comum, em termos de aplicação. O fato do MMSPF indicar este processo em sexto lugar reforça o caráter de ferramenta auxiliar ao desenvolvimento de componentes fundidos, sugerindo processos que não seriam normalmente indicados e oportunizando a inovação.

Os demais processos de fundição de metais (P9, P11, P6, P13, P10, P7, P14) apresentaram uma compatibilidade limitada com os componentes utilizados na aplicação do MMSPF.

### 5.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÓDULO DE SELEÇÃO ECONÔMICA DO MMSPF

A finalidade do módulo de seleção econômica é definir qual o processo de fundição de metais, classificados como aptos na etapa de classificação técnica que apresenta a melhor combinação entre o custo de fabricação e desempenho técnico, avaliado através do menor índice de custo relativo ao desempenho técnico  $\alpha_i$ . A fim de exemplificar a aplicação da etapa de avaliação econômica do MMSPF, utilizaram-se os resultados da classificação técnica, obtidos a partir dos pesos dos critérios, no cenário cinco, para os oito componentes analisados. O cenário cinco foi escolhido por apresentar maior peso para o grupo de critério de forma, que compreende os critérios de complexidade de forma e tolerância dimensional, e para o grupo de critério de produção, que compreende os critérios tamanho de lote e *lead time*, pois são os considerados mais importantes pelos especialistas e também foram utilizados para a escolha dos componentes de aplicação.

São apresentadas, no Apêndice C, as informações dos processos de fundição de metais, necessárias à realização da avaliação econômica dos componentes de aplicação e um

exemplo do cálculo dos parâmetros envolvidos na avaliação econômica. O Quadro 7 apresenta o resultado da avaliação econômica, em função do índice de desempenho técnico relativo ao custo ( $\alpha_i$ ).

Quadro 7 – Resultados do módulo de seleção econômica para o cenário cinco

<b>Componente de aplicação</b>	<b>Conjunto solução da avaliação econômica {processo, <math>CP_i</math> (R\$/kg), <math>\alpha_i</math> (R\$/kg)}</b>
1	{P2, 11,59, 51,70}; {P5, 10,05, 46,18}; {P1, 11,16, 65,16}; {P3, 11,18, 70,03}; {P4, 10,76, 47,37}
2	{P4, 17,89, 120,41}; {P5, 17,49, 122,64}; {P2, 18,01, 130,90}; {P6, 17,56, 163,79}; {P3, 17,66, 173,02}; {P8, 23,56, 250,83}; {P11, 18,97, 209,37}; {P1, 18,69, 207,90}; {P9, 19,27, 220,14}
3	{P4, 5,82, 17,05}; {P5, 5,57, 17,47}; {P2, 5,77, 17,00};
4	{P8, 10,42, 57,18}; {P9, 5,53, 32,17}; {P4, 5,22, 30,69}; {P2, 4,65, 27,88} {P5, 4,59, 28,92}; {P1, 5,07, 33,71}
5	{P15, 7,19, 11,74}; {P10, 7,41, 19,12}
6	{P4, 10,86, 48,59}; {P3, 9,01, 41,62}; {P5, 9,26, 43,25}; {P2, 8,53, 45,99}; {P1, 9,49, 59,17}
7	{P3, 3,44, 15,99}; {P4, 3,88, 18,32}; {P12, 3,41, 16,85}; {P5, 3,32, 16,62}; {P6, 3,33, 19,45}
8	{P3, 2,62, 14,97}; {P4, 3,03, 16,95}; {P5, 2,79, 16,58}; {P6, 2,94, 17,61}; {P2, 3,37, 20,42}; {P12, 2,86, 19,61}

FONTE: Autor.

O MMSPF selecionou o processo areia com resina - cura-frio (P5) como o processo mais adequado para a fabricação do componente de aplicação um. Este processo apresentou um índice de custo relativo ao desempenho técnico  $\alpha_i$  de 46,18 R\$/kg e um custo de estimado de fabricação de 10,05 R\$/kg.

Em relação ao componente de aplicação dois, o MMSPF selecionou o processo silicato-CO<sub>2</sub> (P4) como o mais indicado com índice  $\alpha_i$  de 120,41 R\$/kg. Em relação à análise econômica deste componente deve-se observar que o processo apresentando o menor custo estimado de fabricação foi o de areia com resina - cura-frio (P5), com um custo estimado de 17,49 R\$/kg em relação ao custo de 17,89 R\$/kg apresentado pelo processo silicato-CO<sub>2</sub> (P4).

O MMSPF selecionou o processo de fundição em areia verde – mecanizada (P2) com  $\alpha_i$  de 17,00 R\$/kg como a melhor opção para se fabricar o componente três. O que apresentou menor custo estimado foi o processo areia com resina - cura-frio (P5), com um valor estimado em 5,57 R\$/kg em relação ao valor de 5,77 R\$ apresentado pelo de fundição em areia verde – mecanizada (P2).

O MMSPF selecionou o processo de fundição em areia verde – mecanizada (P2) como a melhor opção econômica para a fabricação do componente de aplicação quatro. Este



processo apresentou um índice de custo relativo ao desempenho técnico  $\alpha_i$  de 27,88 R\$/kg e custo de estimado de fabricação de 4,65 R\$/kg.

Em relação aos componentes de aplicação um, dois, três e quatro, possuem baixo volume de produção, o processo de fundição de metais mais destacado foi o processo areia com resina - cura-frio (P5), pois foi selecionado para a fabricação do componente um (baixa complexidade de forma). Observa-se que o processo areia com resina - cura-frio (P5) apresentou o menor custo estimado de fabricação para os quatro componentes de aplicação de baixo volume de produção e, mesmo assim, foi escolhido como melhor opção em apenas dois componentes. Com estes resultados verifica-se o efeito do  $\alpha_i$  em expressar uma solução de compromisso entre o custo estimado de fabricação e a etapa de classificação técnica. Deste modo, os resultados comprovam que o MMSPF seleciona o melhor processo, combinando custo estimado de fabricação com desempenho técnico, pois um processo mais caro pode ser selecionado se o seu desempenho técnico compensar a diferença.

Em relação ao componente de aplicação cinco, o MMSPF selecionou o processo *squeeze casting* (P15) como o mais indicado para a fabricação deste componente. O índice de custo relativo ao desempenho técnico  $\alpha_i$ , apresentado por este processo, foi de 11,74 R\$/kg. O módulo de seleção econômica confirmou a escolha deste processo como a melhor opção de fabricação.

Em relação aos componentes de aplicação seis, sete e oito o MMSPF selecionou o processo de fundição em areia verde – automatizada (P3) como sendo a melhor opção para a fabricação destes componentes. Os índices de custo relativo ao desempenho técnico  $\alpha_i$  apresentados pelos componentes de aplicação seis, sete e oito foram respectivamente 41,62 R\$/kg, 15,99 R\$/kg e 14,97 R\$/kg. Os resultados apresentados pelo MMSPF para estes componentes podem ser associados ao baixo custo de processamento apresentado por esse processo (Tabela 20), porque, mesmo com altos custos de ferramental, ele se torna competitivo em função de alto volume de produção. De acordo com Kalpakjian e Schmid (2009), a automatização e mecanização são uma das tendências de maior impacto na indústria de fundição, pois, segundo estes autores levam a mudanças na utilização dos equipamentos e da mão de obra. Deste modo, com uma etapa de avaliação econômica que considera a estimação dos custos de fabricação, como é contemplado no MMSPF, é possível captar estes aspectos produtivos que afetam a seleção de processos de fundição de metais, e torná-la mais precisa.

Comparando-se os processos preferidos pelo MMSPF, na etapa de classificação técnica (Quadro 6), em relação aos selecionados na avaliação econômica, com base no cenário

cinco, a avaliação econômica ratificou os resultados da classificação técnica para metade dos componentes de aplicação (dois, cinco, sete e oito). Este resultado confirma a importância de se considerar a estimação de custos de fabricação na seleção de processos de fundição de metais, como é proposto no MMSPF.


#### 5.4 VALIDAÇÃO DO MMSPF

A validação é um processo visando assegurar que tudo o que um modelo pretende representar, ele o faz com precisão (Jagdev *et al.* 1995). Os métodos utilizados na validação são classificados em qualitativos e quantitativos. Métodos qualitativos empregam técnicas subjetivas para a comparação de desempenho, enquanto os métodos quantitativos são baseados sobre o uso de medidas estatísticas (O'KEEFE *et al.* 1987). O procedimento de validação do MMSPF foi desenvolvido com base no método quantitativo.

Nesta tese, a validação será realizada sob a perspectiva da validação orientada ao resultado. De acordo com Lee e O'Keefe (1994), a validação orientada ao resultado, compara o desempenho do sistema com um desempenho esperado, fornecido por um padrão de referência ou por especialistas humanos, de modo a garantir que o sistema apresente um nível de desempenho aceitável.

Foi utilizado um grupo de especialistas em processos de fundição para validar os resultados obtidos com a aplicação do MMSPF. O grupo de quatro especialistas foi composto de professores com experiência da ordem de 20 a 30 anos e profissionais com atuação com mais de 25 anos de experiência em processos de fundição de metais. A validação foi realizada com a utilização de um instrumento apresentado na Figura 27.

O instrumento apresenta o desenho do componente e as informações dos requisitos dos componentes utilizadas no aplicativo computacional do MMSPF. Inicialmente, o especialista é convidado a eliminar os processos não aptos a produzir o componente de acordo com a sua opinião (etapa 1 do instrumento). Em seguida, classificar os processos mais adequados para se produzir o componente, em termos técnicos, de acordo com os requisitos do componente e com base na sua experiência (etapa 2). E dentre, os processos classificados como aptos tecnicamente, indicar um processo como sendo o de sua preferência em termos econômicos para produzir o componente (etapa 3). O Apêndice D apresenta os instrumentos de validação de todos os componentes utilizados na aplicação.



Ordem	Informações do Componente	Valores das Informações		
D1	Material	Liga de cobre para fundição		
D2	Peso (kg)	6,7		
D3	Tamanho de lote anual (peças)	600		
D4	Maior dimensão (mm)	230		
D5	Maior espessura de seção (mm)	17		
D6	Menor espessura de seção (mm)	6		
D7	Rugosidade Superficial Máxima (µm) Ra	3,2		
D8	Ângulo de extração mínimo ( graus)	1,5		
D9	Tolerância Dimensional	± 1,2		
<b>Etapa 1: Com base no componente fundido apresentado acima e considerando as informações apresentadas: Exclua os processos de fundição de metais, apresentados na tabela abaixo, que na sua opinião, não são adequados para produzir o componente com as características apresentadas.</b>				
<b>Etapa 2: Dos processos de fundição de metais não eliminados, qual ou quais na sua opinião podem produzir o componente apresentado atendendo adequadamente todas as informações técnicas apresentadas?</b>				
<b>Etapa 3: Dos processos de fundição de metais julgados como adequados em termos técnicos para produzir o componente apresentado, qual você escolheria como mais adequado do ponto de vista econômico?</b>				
	Processos de Fundição	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
P1	Areia Verde – Manual			
P2	Areia Verde – Mecanizada			
P3	Areia Verde – Automatizada			
P4	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>			
P5	Areia com Resina – Cura frio			
P6	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>			
P7	Processo Molde de Gesso			
P8	Processo Molde Cerâmico			
P9	<i>Investment Casting</i>			
P10	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>			
P11	Fundição Centrífuga - Molde Metálico			
P12	Molde Permanente - Gravidade			
P13	Molde Permanente - Baixa Pressão			
P14	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>			
P15	<i>Squeeze Casting</i>			

Figura 27 – Instrumento de validação do MMSPF, rotor de bomba centrífuga: componente de aplicação dois

FONTE: Autor.

O índice de Williams (Williams, 1976) foi o parâmetro quantitativo utilizado na comparação das informações fornecidas pelos especialistas, a partir do instrumento de validação, em relação aos resultados fornecidos pelo MMSPF. O índice de Williams foi escolhido, pois não existe uma única resposta padrão correta. Neste caso, considera-se a concordância de opinião dos especialistas como sendo a referência de comparação. O índice procura determinar o nível de concordância de um especialista isolado, em relação ao nível de concordância de um grupo de especialistas. Na validação, o aplicativo MMSPF assume o papel do especialista isolado e o grupo de professores e profissionais assume o papel do grupo de referência. As equações (21), (22), (23) apresentam o procedimento de cálculo do índice de Williams.

$$P_0 = \sum_{a=1}^n P_{(0,a)} / n$$

Equação (21)

$$P_n = 2 \cdot \sum_{a=1}^{n-1} \sum_{b=a+1}^n P_{(a,b)} / n \cdot (n - 1) \quad \text{Equação (22)}$$

$$I_n = \frac{P_0}{P_n} \quad \text{Equação (23)}$$

Em que:

$I_n$  = é o índice de Williams;

$P_0$  = é a concordância do especialista isolado em relação aos membros do grupo de especialistas de referência;

$P_n$  = é a concordância dentro do grupo de especialistas de referência;

$n$  = é o número de especialistas no grupo de referência;

$P_{(0,a)}$  = é uma medida pareada que relaciona a interpretação do especialista isolado MMSPF com os  $n$  especialistas do grupo de referência;

$P_{(a,b)}$  = é uma medida pareada que relaciona as interpretações do especialista A com B.

Como medida que relaciona as interpretações dos especialistas utilizou-se o índice *Kappa* ( $\kappa$ ) proposto por Cohen (1960). Segundo Ben-David (2008), o índice *Kappa* é uma medida de concordância ou discordância de duas ou mais pessoas que observam o mesmo fenômeno. Este índice é baseado em duas quantidades  $p_0$  (proporção de concordância observada entre dois observadores) e  $p_c$  (proporção de concordância esperada devida ao acaso), sendo o cálculo deste índice apresentado na equação (24).

$$\kappa = \frac{p_0 - p_c}{1 - p_c} \quad \text{Equação (24)}$$

O índice *Kappa* varia entre -1 (discordância total), 0 (classificação ao acaso) até 1 (concordância total).

O índice de Williams e o índice *Kappa* ( $\kappa$ ) foram empregados na validação por terem sido utilizados em vários trabalhos de validação de sistemas especialistas como os de Mosqueira-Rey e Moret-Bonillo (2000; 2002; 2008).

#### 5.4.1 Validação do Módulo de Seleção Técnica do MMSPF em Relação ao Grupo de Especialistas

A classificação apresentada pelos especialistas para os oito casos de aplicação e os resultados fornecidos pelo MMSPF, para o cenário cinco, são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Resultados para a etapa de classificação técnica fornecidos pelos especialistas e pelo aplicativo do MMSPF com base no cenário cinco

Componentes de aplicação	Especialistas				MMSPF
	A	B	C	D	
1	{P1, P2, P4, P5, P6, P7, P8, P12, P13}	{P1, P5, P12}	{P1, P2, P3}	{P2, P3, P4, P5, P12, P13, P14}	Todos os resultados do Quadro 6.
2	{P1, P2, P4, P5, P6, P12}	{P5, P6, P10, P11, P12}	{P1, P2, P3, P4, P5, P6}	{P4, P5, P6}	
3	{P1, P4, P5}	{P5, P10}	{P4, P5, P6}	{P4, P5, P6}	
4	{P1, P2, P4, P5}	{P1, P5}	{P1, P2, P3}	{P2, P3, P4, P5}	
5	{P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P12, P13, P14}	{P5, P6, P14}	{P15}	{P3, P4, P5, P6, P10, P12, P13, P14}	
6	{P3, P10, P12, P13}	{P2, P5, P12, P13}	{P1, P2, P3}	{P3, P4, P5, P13, P14}	
7	{P2, P3}	{P2, P3, P5}	{P1, P2, P3, P4, P5, P6}	{P2, P3, P4, P5, P6, P10}	
8	{P2, P3, P6}	{P2, P5}	{P1, P2, P3, P4, P5, P6}	{P1, P2, P3, P4, P5}	

FONTE: Autor.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 26, calculam-se os índices *kappa* e Williams, com base nas equações (21), (22), (23) e (24).

A primeira atividade a ser desenvolvida é avaliar o grupo de especialistas de referência, com base no índice de Williams, para verificar o consenso do grupo em relação a cada um dos componentes de aplicação. De acordo com Mosqueira-Rey e Moret-Bonillo (2002, 2008), o valor mínimo para o índice de Williams que um especialista deve apresentar é 0,6. Segundo estes autores, o grupo de referência de especialistas deve ser homogêneo, com os níveis de conhecimentos e experiências comparáveis. No entanto, se o parecer de um dos especialistas do grupo de referência difere claramente do restante do grupo, este deve ser retirado para manter o consenso do grupo e a precisão da referência de comparação.

O especialista B apresentou um valor de índice de Williams menor que 0,6 para os componentes de aplicação dois e três, sendo retirado do grupo de referência nestes

componentes. O mesmo ocorreu com o especialista C em relação aos componentes de aplicação um e seis, sendo nestes componentes, retirado do grupo de referência.

A Figura 28 apresenta os valores dos índices de Williams, do grupo de especialistas de referência para os oito componentes de aplicação.

Com base na Figura 28 pode-se observar que o grupo de especialistas de referência apresenta consenso (índice de Williams superior a 1) em relação aos processos de fundição de metais escolhidos para sete componentes de aplicação (exceto componente 5) e assim podem ser utilizados como referência para a validação dos resultados do módulo de seleção técnica do MMSPF.

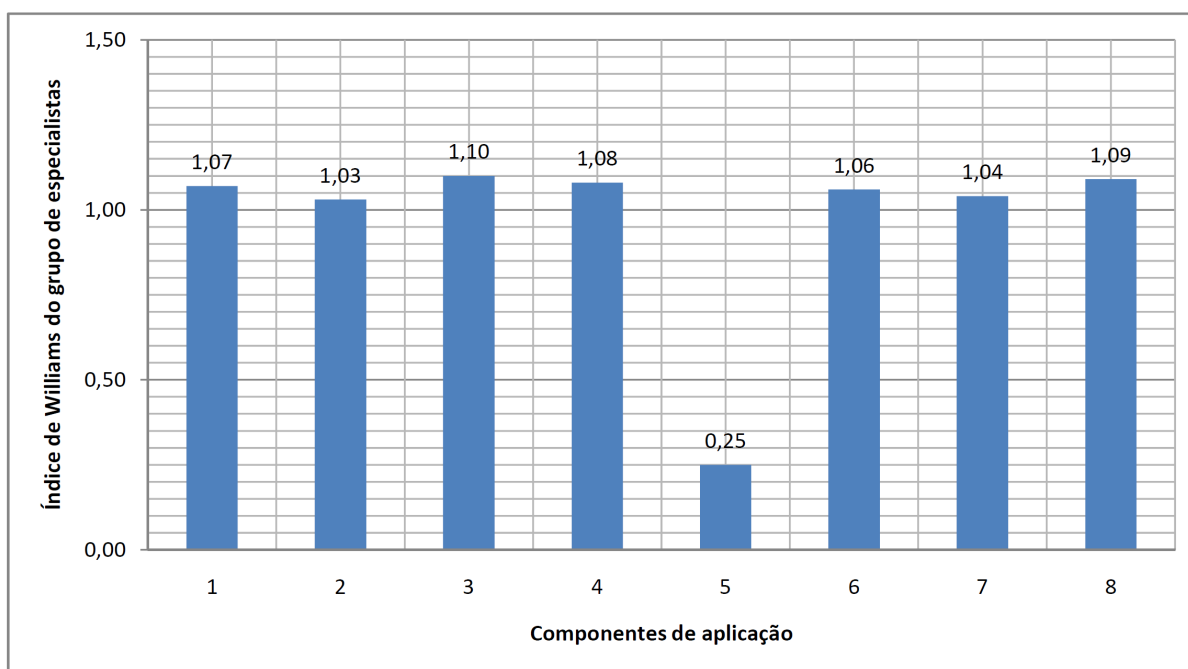


Figura 28 – Resultados do índice de Williams apresentado pelo grupo de especialistas para os oito componentes de aplicação

FONTE: Autor.

Os índices de Williams para o grupo de especialistas em relação ao componente 5 ficaram todos abaixo de 0,6. Indicando que não houve consenso a respeito dos processos de fundição de metais mais adequados para se produzir este componente. Deste modo, o grupo de especialistas não pode ser considerado como referência para a validação do MMSPF em relação ao componente cinco. Deste modo, não se realizou a validação do módulo de seleção técnica para este componente. Deve-se observar que na validação, quando se utiliza o índice de Williams, a referência é obtida pelo consenso do grupo de especialistas; quando estes não

concordam a respeito de uma avaliação, a referência de comparação é perdida. De acordo com Mosqueira-Rey e Moret-Bonillo (2008) quando este tipo de situação ocorre, deve-se buscar alternativas de se obter consenso no grupo. O que não foi possível no método de validação desta tese, pois o instrumento de validação foi aplicado individualmente e não ao grupo de especialistas.

O Quadro 8 apresenta o índice de Williams para todos os resultados apresentados pelo MMSPF no módulo de seleção técnica.

Quadro 8 - Resultados da validação do módulo de seleção técnica do MMSPF

Cenário	Índice de Williams para os componentes de aplicação conforme o cenário de pesos dos critérios							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,57	1,16	0,62	0,68	SR	0,68	*	1,16
2	1,94	1,01	*	0,62		0,68	*	0,82
3	0,69	*	0,62	*		*	*	0,94
4	0,85	*	*	*		*	*	*
5	1,57	0,70	0,81	0,99		0,68	0,78	1,16
6	1,40	*	*	0,67		0,68	0,72	1,16
7	1,40	*	0,81	0,67		0,68	*	1,16
8	0,87	*	*	*		1,83	*	0,92
9	0,87	*	*	*		1,83	*	0,92
10	1,15	*	*	0,62		1,09	0,60	0,69
11	0,39	*	*	*		*	*	*
12	0,65	*	*	*		1,13	*	*
13	1,15	*	*	0,99		*	0,78	1,16
14	*	*	*	0,68		1,96	*	0,82
15	0,60	*	0,62	0,67		1,89	*	0,70
16	*	*	*	*		1,54	*	*

FONTE: Autor.

LEGENDA:

\* - Representa valores de índice de Williams abaixo de 0,6.

SR – Sem referência, o grupo de especialistas não apresentou concordância entre si.

Com base nos resultados do Quadro 8, pode-se observar que o MMSPF produziu resultados válidos de acordo com o grupo de referência de especialistas para todos os cenários de pesos avaliados. Com especial destaque para o cenário de peso cinco, o qual apresentou resultados válidos para todos os componentes de aplicação com referências válidas.

A Figura 29 apresenta os valores do índice de Williams da validação do MMSPF, em relação ao grupo de especialistas de referência para os oito componentes de aplicação, para o cenário cinco de pesos dos critérios.

Segundo Mosqueira-Rey e Moret-Bonillo (2000), se o valor de índice de Williams é menor que 1, a situação que ocorre em relação aos componentes de aplicação dois, três, seis e sete, indica que o nível de concordância do MMSPF, em relação ao grupo de especialistas de

referência, é menor do que o nível de concordância entre os membros do grupo de referência. O valor mínimo aceitável para o índice de Williams é de 0,6 segundo Mosqueira-Rey e Moret-Bonillo (2002). Como os valores do índice de Williams apresentados na validação do MMSPF ficaram acima de 0,6 e abaixo de 1, pode-se afirmar que, em relação a estes componentes, os resultados apresentados pelo MMSPF não estão no mesmo nível dos apresentados pelo grupo de referência, mas podem ser considerados como válidos em relação ao grupo de referência.

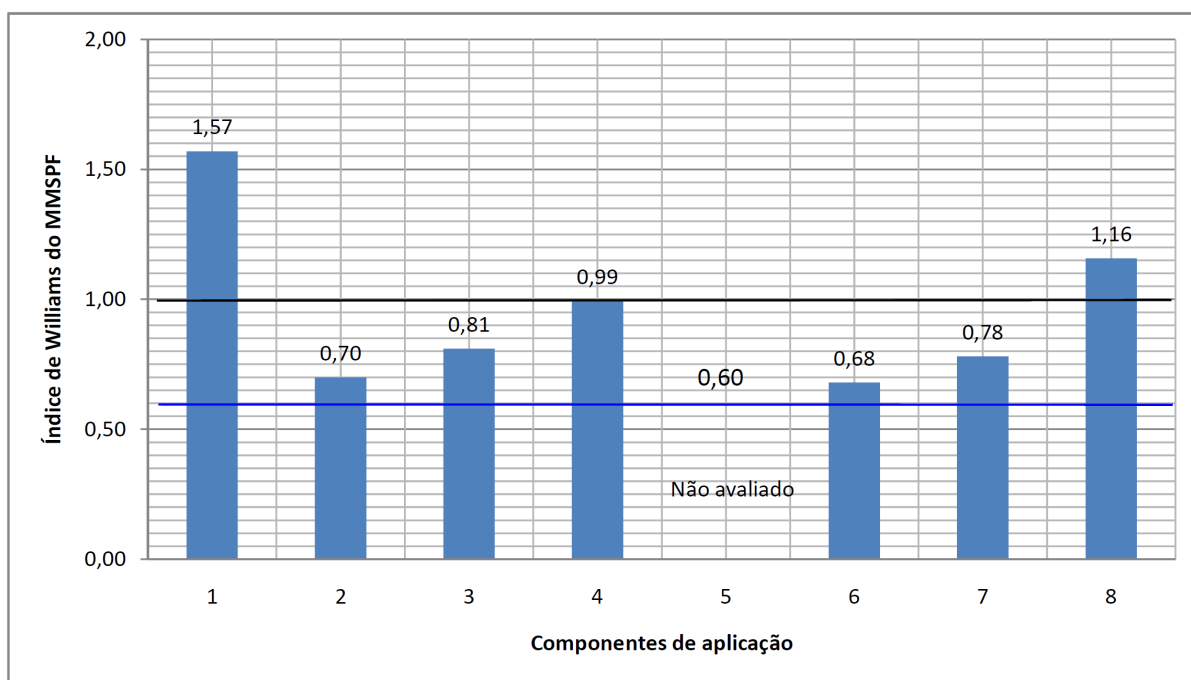


Figura 29 – Resultados do índice de Williams apresentado pelo MMSPF com pesos do cenário 5 em relação ao grupo de especialistas para os oito componentes

FONTE: Autor.

Segundo Mosqueira-Rey e Moret-Bonillo (2000), se o valor de índice de Williams é menor que 1, a situação que ocorre em relação aos componentes de aplicação dois, três, seis e sete, indica que o nível de concordância do MMSPF, em relação ao grupo de especialistas de referência, é menor do que o nível de concordância entre os membros do grupo de referência. O valor mínimo aceitável para o índice de Williams é de 0,6 segundo Mosqueira-Rey e Moret-Bonillo (2002). Como os valores do índice de Williams apresentados na validação do MMSPF ficaram acima de 0,6 e abaixo de 1, pode-se afirmar que, em relação a estes componentes, os resultados apresentados pelo MMSPF não estão no mesmo nível dos apresentados pelo grupo de referência, mas podem ser considerados como válidos em relação ao grupo de referência.



Quando o índice de Williams assume o valor próximo a 1, significa que os resultados apresentados pelo MMSPF concordam com o grupo de referência de especialistas, no mesmo nível em que os membros do grupo concordam entre si. Esta situação ocorre para o componente quatro. Neste caso, o desempenho do MMSPF é similar aos especialistas do grupo de referência.

Quando o valor do índice de Williams é maior que 1, situação que ocorre com os componentes um e oito, indica que o MMSPF concorda com o consenso do grupo de referência.

Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que o desempenho do módulo de seleção técnica mostrou-se compatível com o grupo de referência, indicando opções corretas para todos os cenários, especialmente para o cenário cinco. Com base nos resultados do Quadro 8, pode-se inferir que as preferências de decisão do grupo de referência de especialistas é compatível com o cenário cinco, o qual fornece maiores pesos ao grupo de critério de forma que compreende os critérios de complexidade de forma e tolerância dimensional e ao grupo de critério de produção, que compreende os critérios tamanho de lote e *lead time*. Os resultados da validação do módulo de seleção técnica servem também para validar a escolha da amostra para aplicação do MMSPF, pois de acordo com o grupo de referência de especialistas, estes são os critérios mais relevantes para se selecionar processos de fundição de metais.

#### 5.4.2 Validação do Módulo de Seleção Econômica do MMSPF em Relação ao Grupo de Especialistas

Como o resultado da avaliação econômica depende do resultado da etapa de classificação técnica, decidiu-se que, na validação do módulo de seleção econômica, serão considerados dois aspectos: (i) se processos escolhidos pelos especialistas como resultado da etapa 3 do instrumento de validação fazem parte do conjunto solução da etapa de classificação técnica do MMSPF, gerando um percentual de indicação correta (%); (ii) se o resultado final, apresentado pelo MMSPF, é coincidente com a opinião de algum especialista que compõe o grupo de referência. Os resultados da avaliação, em relação aos dois aspectos descritos, são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Resultados da validação do módulo de seleção econômica

Componentes de aplicação	Especialistas				MMSPF	Indicação correta (%)	MMSPF	Concordância especialista
	A	B	C	D				
1	P1	P5	P3	P2	{P1, P2, P3, P4, P5}	100	P5	sim
2	P5	P6	P1	P5	{P1, P2, P3, P4, P5, P6, P8, P9, P11}	100	P4	não
3	P5	P5	P5	P5	{P2, P4, P5}	100	P2	não
4	P1	P1	P3	P2	{P1, P2, P4, P5, P8, P9}	67	P2	sim
5	P12	P14	P15	P10	{P10, P15}	50	P15	sim
6	P12	P12	P3	P13	{P1, P2, P3, P4, P5}	25	P3	sim
7	P3	P2	P3	P3	{P3, P4, P5, P6, P12}	50	P3	sim
8	P2	P2	P2	P3	{P2, P3, P4, P5, P6, P12}	100	P3	sim

FONTE: Autor.

Em relação ao primeiro aspecto considerado na validação do módulo de seleção econômica, percentual de indicações corretas, observa-se, na Tabela 27 que o menor desempenho do MMSPF ocorre para o componente de aplicação seis. O baixo desempenho, em relação a este componente, pode ser explicado pela tolerância dimensional utilizada como entrada do MMSPF. De acordo com a Tabela 23, o componente seis apresenta uma tolerância dimensional de  $\pm 2,0$  mm. No entanto esta tolerância é relativamente grande para componentes automotivos. Provavelmente o especialista ao visualizar a foto do componente seis (componente automotivo) no instrumento de validação, imaginou uma tolerância mais estreita de  $\pm 1,0$  mm. O MMSPF utiliza as informações dos processos na forma de funções de pertinência, e trabalha com diferentes fontes de informação. Se o componente solicita  $\pm 2$  mm de tolerância, o MMSPF vai procurar selecionar o melhor processo, de acordo com as necessidades do componente (funções de pertinência e agregação de informação). Mudando-se a tolerância para  $\pm 1,0$  mm no aplicativo do MMSPF (mantendo-se todos os demais requisitos), pois este seria o valor mais usual para um componente automotivo, o conjunto solução do MMSPF passa a ser {P3, P4, P5, P6, P12, P13} e o índice de indicação correta passa a ser 100%. Isto demonstra dois fatos importantes: (i) a utilização de dados na forma de funções de pertinência é importante para dar precisão à seleção de processos de fundição de metais; (ii) é necessário estabelecer, com precisão, as informações a serem inseridas no MMSPF.

Em relação ao segundo aspecto considerado na validação do módulo de seleção econômica, a concordância do resultado final da avaliação econômica apresentado pelo

MMSPF com algum especialista que faz parte do grupo de referência, o resultado apresentado na Tabela 27 indica que seis componentes, apontados pelo MMSPF, estão em concordância com pelo menos um especialista do grupo de referência, não concordando com algum especialista nos componentes dois e três.

Deve-se ressaltar que o MMSPF só não optou pelo processo de menor custo estimado de fabricação nos componentes de aplicação dois, três e quatro que possuem baixos volumes de produção. Se o MMSPF optasse pelo processo de menor custo, nestes componentes de aplicação, o índice de concordância com especialistas do grupo de referência seria de sete, em oito componentes de aplicação, indicados corretamente pelo MMSPF. A preferência do MMSPF pelo processo silicato-CO<sub>2</sub> (P4), em relação ao processo areia com resina – cura frio (P5), na fabricação do componente de aplicação dois, está relacionada ao desempenho ambiental, pois estes processos apresentam desempenho técnico similar e diferem, acentuadamente em termos ambientais. Este resultado demonstra a importância de se considerarem critérios ambientais na seleção de processos de fundição de metais, como propõe o MMSPF. Em relação ao componente de aplicação três e quatro, a preferência apresentada pelo MMSPF em favor do processo de fundição em areia verde – mecanizada (P2), não pode ser atribuída exclusivamente ao desempenho ambiental deste processo, mas em relação ao conjunto dos critérios de classificação técnica. Este resultado comprova a importância de se realizar-se a seleção de processos de fundição de metais com base em um índice que pondere o custo estimado de fabricação em relação ao desempenho técnico como  $\alpha_i$  utilizado no MMSPF.

## 6 CONCLUSÃO

O objetivo principal da tese foi desenvolver um método multicriterial de seleção de processos de fundição de metais (MMSPF) para fabricação de componentes, considerando-se critérios técnicos, ambientais e econômicos para ser aplicado nas fases iniciais do desenvolvimento do componente.

O MMSPF é constituído pelos módulos de seleção técnica e econômica. O módulo de seleção técnica é destinado a antecipar as atividades de seleção de processos, a serem desenvolvidas na fase de projeto preliminar, enquanto o módulo de seleção econômica é destinado a antecipar as atividades de seleção de processos, necessárias à fase de projeto detalhado. O MMSPF realiza a seleção de processos de forma sequencial. Inicialmente, avaliando aspectos técnicos e, posteriormente, considerando aspectos econômicos.

O módulo de seleção técnica é constituído pelas etapas operacionais de tratamento das informações, o qual é desenvolvido com base na equação (10), responsável pela agregação da informação proveniente das diferentes fontes, sendo uma das inovações propostas pelo MMSPF. A etapa de separação inicial é a responsável por eliminar processos que não atendam aos requisitos do componente com base em sete critérios. A equação (11) é empregada para realizar o processo de eliminação. Os critérios de classificação técnica são dipostos em quatro grupos, sendo eles: forma, produção, qualidade metalúrgica e impacto ambiental, cada um deles com dois critérios, totalizando oito critérios contemplados no módulo de classificação técnica. A etapa de determinação dos pesos dos oito critérios de classificação técnica foi realizada com base no método AHP. A classificação técnica é realizada por meio de uma ponderação aditiva, com os resultados dos critérios normalizados, sendo aprovados os processos com valor de  $R_i$  maior que índice de compatibilidade técnica mínima.

O módulo de seleção econômica é composto pelas etapas operacionais de determinação do modelo de estimação de custo e avaliação econômica. Na etapa de determinação do modelo de custo, apresenta-se a equação (18) destinada a estimar o custo de fabricação dos processos de fundição de metais apresentados no MMSPF. Nesta, etapa os coeficientes necessários à aplicação da equação (18) foram determinados. Na etapa de avaliação econômica, apresenta-se o índice de custo relativo ao desempenho técnico ( $\alpha_i$ ) o qual é utilizado como indicador da avaliação econômica.

O MMSPF contempla as seis classes de ligas metálicas mais utilizadas na produção de componentes fundidos: aços, ferros fundidos, ligas de alumínio, ligas de cobre, ligas de

magnésio e ligas de zinco, apropriadas aos processos de fundição de metais destinados à produção de peças. O MMSPF contempla os quinze principais processos de fundição de metais destinados a produção de peças: areia verde – manual (P1), areia verde – mecanizada (P2), areia verde – automatizada (P3), areia silicato - CO<sub>2</sub> (P4), areia com resina – cura frio (P5), areia com resina – *shell molding* (P6), processo molde de gesso – *plaster molding* (P7), processo molde cerâmico (P8), *investment casting* (P9), molde cheio - *lost foam* (P10), fundição centrífuga - molde metálico (P11), molde permanente – gravidade (P12), molde permanente - baixa pressão (P13), fundição sob pressão - *die casting* (P14) e *squeeze casting* (P15) como conjunto solução da seleção.

Esta tese foi desenvolvida em cinco etapas. A primeira etapa compreende uma revisão de literatura a respeito de métodos de seleção de processos de fabricação e métodos de seleção de processos de fundição de metais, decisão multicritério discreta e estimação de custos de fabricação. Esta etapa colaborou para a definição das principais diretrizes operacionais do MMSPF. A segunda etapa, refere-se à elaboração do método multicriterial de seleção de processos de fundição de metais. A terceira etapa, compreende o desenvolvimento de um aplicativo computacional. A quarta etapa envolve a aplicação e validação do MMSPF. Nesta etapa, foram escolhidos oito componentes com base nos fatores de complexidade de forma, tipo de liga e tamanho de lote para aplicação do MMSPF. A validação dos módulo de seleção técnica e econômica foi realizado com um instrumento de validação aplicado a um grupo de referência, formado por quatro especialistas em processos de fundição de metais. O índice de Williams foi utilizado como índice quantitativo de avaliação, no módulo de seleção técnica. A comparação com os resultados do grupo de referência foi o método de avaliação adotado no módulo de seleção econômica. A quinta etapa abrange as conclusões do trabalho e sugestões para a realização de trabalhos futuros.

Os aspectos positivos dos métodos existentes na literatura operacionalizados no MMSPF foram: (i) consideração de múltiplos critérios de seleção, os quais estão bem identificados e envolvem aspectos de projeto, qualidade e de produção; (ii) apresentação das informações utilizadas nos métodos de seleção, na forma de funções de pertinência e variáveis linguísticas. As inovações propostas pelo MMSPF foram: (i) consolidação das diferentes fontes de informação dos processos a serem utilizadas no MMSPF, por meio de uma função de agregação; (ii) utilização de aspectos ambientais como critérios para seleção de processos de fundição de metais; (iii) consideração dos custos estimados de fabricação para seleção de processos de fundição de metais a partir de um índice de custo de fabricação, relativo ao desempenho técnico.

Com relação ao objetivo específico de implementar uma avaliação econômica dos processos de fundição de metais foi inserido um módulo de seleção econômica no MMSPF, gerador de um índice que observa o custo de fabricação estimado, pela equação (18), em relação ao desempenho técnico atingido pelo processo na etapa de classificação técnica, que considera tanto os requisitos do componente em análise, quanto os pesos dos critérios de classificação técnica.

Com relação ao segundo objetivo específico foi desenvolvido um aplicativo computacional para implementar o MMSPF, apresentado no capítulo 4. O aplicativo computacional do MMSPF expõe uma arquitetura composta por três elementos principais: um *software* de planilha eletrônica (Microsoft Excel), no qual são realizadas todas as operações matemáticas necessárias ao desenvolvimento das etapas operacionais do MMSPF; um banco de dados, o *software* livre SQLite, responsável por armazenar as informações utilizadas no aplicativo computacional do MMSPF; e a interface gráfica do usuário, que atua como elemento de conexão entre o banco de dados, o *software* de planilha eletrônica e o usuário. O aplicativo computacional possui sete interfaces gráficas que contemplam todas as etapas operacionais do MMSPF.

Com relação ao terceiro objetivo específico, foram analisados os critérios de separação inicial que desqualificaram o maior número de processos de fundição. O critério de separação inicial mais discriminante foi o tipo de liga, responsável por eliminar 26 processos. Este comportamento é resultado da forte interação existente entre processo de fabricação e tipo de liga. Enquanto os critérios de separação inicial de ângulo de extração mínimo, menor espessura de seção e peso não eliminaram nenhum processo de fundição. Conclui-se que, os valores apresentados para estes critérios para os componentes de aplicação, encontram-se dentro das faixas usuais para os processos de fundição contemplados no MMSPF.

Com relação ao quarto objetivo específico, foram identificados os processos de fundição com maior compatibilidade técnica com os oito componentes utilizados na aplicação do MMSPF. A ordenação dos processos com maior compatibilidade técnica obtida, com base no somatório dos  $R_i$  foi a seguinte: P4 - areia silicato – CO<sub>2</sub> (12,41), P2 - areia verde – mecanizada (10,73), P3 - areia verde – automatizada (9,48), P8 - processo molde cerâmico (8,93), P12 - molde permanente – gravidade (7,36), P15 - *squeeze casting* (6,23), P5 - areia com resina – cura frio (6,11), P1 - areia verde – manual (4,97), P9 - *investment casting* (3,36), P11 - fundição centrífuga - molde metálico (3,11), P6 - areia com resina – *shell molding* (2,45), P13 - molde permanente - baixa pressão (1,82), P10 - molde cheio - *lost foam* (0,95),

P7 - processo molde de gesso – *plaster molding* (0,20) e P14 - fundição sob pressão - *die casting* (0,07).

Sugere-se integrar os processos de fundição de lingotes ao MMSPF para contemplar todos os processos que se utilizam de fusão e solidificação de metais, na obtenção de componentes metálicos fundidos e incorporar a seleção específica da liga no MMSPF.

O escopo do MMSPF contempla apenas processos de fundição de metais. Sugere-se a ampliação do MMSPF para outros processos de conformação metalúrgica, adaptando-se principalmente o conjunto de critérios de seleção e as fontes de informação.

## REFERÊNCIAS

ABIFA. Indicadores, desempenho do setor de fundição. **Fundição & Matérias Primas**. v. 93, p. 88-91, 2008.

AKARTE, M. M.; RAVI, B. Casting product-process-producer compatibility evaluation and improvement. **International Journal of Production Research**, v. 45 p. 4917-4936, 2007.

AKARTE, M. M.; RAVI, B.; CREESE, R. C. Casting process selection using AHP and fuzzy logic. **International Seminar on Manufacturing Technology, Beyond 2000**, Bangalore, p. 468-482, 1999.

ALLISON, J.; LI, M.; WOLVERTON, C.; SU, X. Virtual aluminum castings: An industrial application of ICME. **JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society**, v. 58, n. 11, p. 28-35, 2006.

AMERICAN FOUNDRY SOCIETY. **A Design Study in Aluminum Casting**. Disponível em: <[http://www.sfsa.org/tutorials/eng\\_block/GMBlock.pdf](http://www.sfsa.org/tutorials/eng_block/GMBlock.pdf)> Acesso em: 25 jan. 2010.

ARCHIBALD, J. J. & SMITH, R. L.. Resin Binder Processes. In: **ASM. Metals Handbook, v. 15 - Casting**. Metals Park: ASM International, 1988. p. 462-484.

ASHBY, M. F.; BRÉCHET, Y. J. M.; CEBON, D.; SALVO, L. Selection strategies for materials and processes. **Materials and Design**, v. 25, p. 51-67, 2004.

ASHBY, M.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materials Engineering, Science, Processing and Design**. Oxford: Elsevier, 2007. p. 14-21.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Guia ABIFA de fundição, anuário 2009**. São Paulo, 2009.

ASTHANA, R.; KUMAR, A.; DAHOTRE, N. **Materials Processing and Manufacturing Science**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. p. 57-86.

BEELEY, P. **Foundry Technology**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. p. 3-14.

BEELEY, P. **Foundry Technology**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.b. p. 659-661.

BELIAKOV, G.; PRADERA, A.; CALVO, T. **Aggregation Functions: A Guide for Practitioners**. Berlin: Springer, 2007. p. 123 – 270.

BELTON, V.; STEWART, T. J. **Multiple Criteria Decision Analysis. An Integrated Approach**. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2002. p. 1-17.

BEN-DAVID, A. Comparison of classification accuracy using Cohen's Weighted Kappa. **Expert Systems with Applications**, v. 34, p. 825-832, 2008.

BOLJANOVIC, V. **Metal Shaping Processes**. New York: Industrial Press, 2009. p. 23-48.



BRALLA, J. G. **Design for Manufacturability Handbook**. 2. ed. Boston: McGraw-Hill, 1986. p. 5.3-5.80.

BROWN, J. R. **Foseco Ferrous Foundryman's Handbook**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. p. 216 – 225.

CHAKRABORTY, S.; DEY, S. QFD-based expert system for non-traditional machining processes selection. **Expert Systems with Applications**, v. 32, p. 1208–1217, 2007.

CHAN, K.; KING, C.; WRIGHT, P. COMPASS: Computer oriented materials, processes, and apparatus selection system. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 17, n. 4, p. 275-286, 1998.

CHEN, Y.; GUPTA S. K; FENG, S. A Web-based process/material advisory system. In: ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, 2000, Orlando, United States. **Proceedings...** Orlando: 2000. p. 105-113.

CHENG, C. H.; YANG, K. L.; HWANG, C. L. Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weight. **European Journal of Operational Research**, v. 116, p. 423-435, 1999.

CHENG, E. W. L.; LI, H.; HO, D. C. K. Analytic hierarchy process (AHP). A defective tool when used improperly. **Measuring Business Excellence**, v. 6, n. 4, p. 33-37, 2002.

CHIANG, K. T; LIU, N. M; CHOU, C. C. Machining parameters optimization on the die casting process of magnesium alloy using the grey-based fuzzy algorithm. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 38, n. 3-4, p. 229-237, 2008.

CHOO, E. U.; WEDLEY, W. C. A common framework for deriving preference values from pairwise comparison matrices. **Computers & Operations Research**, v. 31, p. 893-908, 2004.

CHOU, J. S. Web-based CBR system applied to early cost budgeting for pavement maintenance project. **Expert Systems with Applications**, v. 36, p. 2947-2960, 2009.

CHOUGULE, R. G.; RAVI, B. Casting cost estimation in an integrated product and process design environment. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 19, n. 7, p. 676-688, 2006.

CHOUGULE, R. G.; RAVI, B. Casting Process Planning Using Case Based Reasoning. **Transactions of the American Foundry Society**, v. 111, p. 1321-1330, 2003.

CHOUGULE, R. G.; RAVI, B. Variant process planning of castings using AHP-based nearest neighbour algorithm for case retrieval. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 6, p. 1255-1273, 2005.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, p. 37-46, 1960.

CORREIA, D. S.; FERRARESI, V. A. Welding process selection through a double criteria: Operational costs and non-quality costs. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 184, p. 47-55, 2007.

CREESE, R. C; ADITHAN, M.; PABLA, B. S. **Estimating and Costing for the Metal Manufacturing Industries**. New York: Marcel Dekker, 1992. p. 99-193.

DANTAN, J. Y.; HASSAN, A.; ETIENNE, A.; SIADAT, A.; MARTIN, P. Information modeling for variation management during the product and manufacturing process design. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, v. 2, p. 107-118, 2008.

DARWISH, S .M.; EL-TAMIMI, A. M. The selection of casting process using expert system. **Computers in Industry**, v. 30, n. 2, 1996, p. 77-86, 1996.

DAWS, K. M.; AL-DAWOOD, Z. I.; AL-KABI, S. H. Selection of metal casting processes: A fuzzy approach. **Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering**, v. 2, n. 1, p. 45-52, 2008.

DEPCIK, C.; ASSANIS, D. N. Graphical user interfaces in an engineering educational environment. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 13, p. 48-59, 2005.

DEZENA, M. L. C.; LOPES, E. J. & FERREIRA, F. F. Sistema de recuperação de areias alcalinas de fundição. **Fundição & Matérias Primas**. v. 57, p. 48-58, 2004.

DISA INDUSTRIES A/S. **Disa new generation**. Herlev, 2007. Catálogo.

DONG, Y.; XU, Y.; LI, H.; DAI, M. A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 186, p. 229-242, 2008.

DORCIC, J. L.; VERMA, S. K. Squeeze Casting. In: ASM. **Metals Handbook, v. 15 - Casting**. Metals Park: ASM International, 1988. p. 710-719.

DURÁN, O.; AGUILO, J. Computer-aided machine-tool selection based on a Fuzzy-AHP approach. **Expert Systems with Applications**, v. 34, p. 1787-1794, 2008.

ER, A.; DIAS, R. A rule-based expert system approach to process selection for cast components. **Knowledge-Based Systems**, v. 13 p. 225-234, 2000.

ER, A.; SWEENEY, E.; KONDIC, V. Knowledge-based system for casting process selection. **AFS Transactions**, v. 104 p. 363-370, 1996.

ESAWI, A. M. K.; ASHBY, M. F. Computer-based selection of joining processes methods, software and case studies. **Materials and Design**, v. 25, p. 555–564, 2004.

ESAWI, A. M. K.; ASHBY, M. F. Cost estimates to guide pre-selection of processes, **Materials and Design**, v. 24, p. 605–616, 2003.

ESAWI, A. M.K.; ASHBY, M. F. Cost –based ranking for manufacturing process selection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTEGRATED DESIGN AND

MANUFACTURING IN MECHANICAL ENGINEERING, 2, 1998, Compiègne, France. **Proceedings...** Compiègne: 1998a. p. 1001-1008.

ESAWI, A. M.K.; ASHBY, M. F. The Development and use of a software tool for selecting manufacturing processes at the early stages of design. In: WORLD CONFERENCE ON INTEGRATED DESIGN AND PROCESS TECHNOLOGY, 3, 1998, Berlin, Germany. **Proceedings...** Berlin: 1998b. p. 210-217.

FENG, S.; SONG, E. Information modeling of conceptual process planning integrated with conceptual design. In: THE DESIGN FOR MANUFACTURING CONFERENCE, 2000 ASME DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCES, 5, 2000, Baltimore, United States. **Proceedings...** Baltimore: ASME, 2000. p. 1-9.

FENG, S.; ZHANG, Y. Conceptual process planning a definition and functional decomposition. In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING, 1999, Nashville, United States. **Proceedings...** Nashville: ASME, 1999. p. 97-106.

FERRER, I.; RIOS, J.; CIURANA, J. An approach to integrate manufacturing process information in part design phases. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 2085-2091, 2009.

FIGLIORE, S.; ZANETTI, M. C. Foundry wastes reuse e recycling in concrete production. **American Journal of Environmental Sciences**, v. 3, n. 3, p. 135-142, 2007.

GARCIA, A. **Solidificação – Fundamentos e aplicações**. 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2007. p. 19-28.

GAYRETLI, A.; ABDALLA, H. S. A feature based prototype system for the evaluation and optimisation of manufacturing processes. **Computers & Industrial Engineering**, v. 37, p. 481-484, 1999.

GHOMASHCHI, M. R.; VIKHROV, A. Squeeze casting: an overview. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 101, p. 1-9, 2000.

GIACHETTI, R. E. A decision support system for material and manufacturing process selection. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 9, p. 265-276, 1998.

GLOWNIA, J. Metal casting and moulding processes. In: KOSHAL, D. **Manufacturing Engineer's Reference Book**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1993. p. 3.1-3.21.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. p. 41-61.

GONÇALVES, E. C. **SQLite, Muito Prazer!** Disponível em:  
<<http://www.devmedia.com.br/post-7100-SQLite-Muito-Prazer.html>> Acesso em: 14 jul. 2010.

GÖZEL, T.; EMINOGLU, U.; HOCAOGLU, U. A tool for voltage stability and optimization (VS&OP) in radial distribution systems using matlab graphical user interface (GUI). **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 16, p. 505-518, 2008.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing, Materials, Processes, and Systems**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons, 2007. p. 195-245.

GUESSER, W. L.; OLIVEIRA, C. G. & BAUMER, I. O uso da simulação do processo de fundição no desenvolvimento de peças em ferro fundido nodular. **In: IV Seminário de Fundição ABM, 2003**, Volta Redonda. IV Seminário de Fundição ABM 2003, 2003.

GUPTA, S.K.; CHEN, Y.; FENG, S.; SRIRAM, R. A system for generating process and material selection advice during embodiment design of mechanical components. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 22, n. 1, p. 28-45, 2003.

GUSTAFSSON, E.; STRÖMBERG, N. Shape optimization of castings by using successive response surface methodology. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 35, n. 1, p. 11-28, 2008.

HERRERA, F.; HERRERA-VIDEIRA, E. Linguistic decision analysis: steps for solving decision problems under linguistic information. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 115, p. 67-82, 2000.

HOLMGREN, M. Produção sustentável de fundidos nas fundições da Suécia. **Fundição & Matérias Primas**. v. 61, p. 02-06, 2004.

HOLMSTRÖM, A; LARSSON, F.; RUNESSON, K; EDLUND, S. Optimization strategy in the development process with application to cast components. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 35, n. 1, p. 69-77, 2008.

HUNTER AUTOMATED MACHINERY CORP. **The XL an innovation in matchplate molding technology**. Schaumburg, 2008. Catálogo.

INSTITUTO DE METAIS NÃO FERROSOS (ICZ). **Características técnicas do zinco**. Disponível em: < <http://www.icz.org.br/zinco-caracteristicas-tecnicas.php> > Acesso em: 30 jan. 2010.

JAGDEV, H. S.; BROWNE, J.; JORDAN, P. Verification and validation issues in manufacturing models. **Computers in Industry**, v. 25, p. 331-353, 1995.

JAIN, N. K.; JAIN, V. K. Process selection methodology for advanced machining processes. **Journal of Advanced Manufacturing Systems**, v. 2, n. 1, p. 5-45, 2003.

JENDRUCKO, R. J.; BORDELON, G. L.; McDAVID, J. A. Opportunities for Foundry Energy Conservation Based on Selected Case Studies. **Energy Engineering**, v. 100, n. 2, p. 41-49, 2003.

JI, P.; JIANG, R. Scale transitivity in the AHP. **Journal of the Operational Research Society**, v 54, p. 896-905, 2003.

- JOHNSON, M. D.; KIRCHAIN, R. E. Quantifying the effects of parts consolidation and development costs on material selection decisions: A process-based costing approach. **International Journal Production Economics**. v. 119, p. 174–186, 2009.
- JOHNSON, K. W.; LANGDON, P. M.; ASHBY, M. F. Grouping materials and processes for the designer: an application of cluster analysis. **Materials and Design**, v. 23, p. 1-10, 2002.
- JORSTAD, J. L. Permanent mold casting processes. **Advanced Materials & Processes**, v. 166, n. 4, p. 30-34, 2008.
- JORSTAD, J. L. Shape Casting Processes - An Introduction. In: **ASM. Metals Handbook, v. 15 – Casting**. Metals Park: ASM International, 2008. p. 485 - 487.
- JUNG, C.F. **Metodologia Científica - Ênfase em Pesquisa Tecnológica**. Disponível em <<http://www.jung.pro.br>> Acesso em: 07 de abr. 2009.
- KAHRAMAN, C. Multi-Criteria Decision Making Methods and Fuzzy Sets. In: \_\_\_\_\_. **Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making: Theory an applications with recent developments**. New York: Springer Science e Business Media, 2008. p. 1-18.
- KAHRAMAN, C.; BIRGÜN, S.; YENEN, V. Z. Fuzzy Multi-Attribute Scoring Methods with Applications. In: KAHRAMAN, C.. **Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making: Theory an applications with recent developments**. New York: Springer Science e Business Media, 2008. p. 187-208.
- KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6. ed. New York: Prentice Hall, 2009.
- KANICKI, D. Casting advantages, applications an market size. In: **ASM. Metals Handbook, v. 15 - Casting**. Metals Park: ASM International, 1988. p. 54-73.
- KARTHIK, S.; CHUNG, C. W.; RAMANI, K.; TOMOVIC, M. M. Methodology for metalcasting process selection. In: WORLD CONGRESS OF THE SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, 2003, Detroit, United States. **Proceedings...** Detroit: SAE, 2003. paper: 03M-199.
- KAY, I. M. Metalcasting processes. In: GENG, H. **Manufacturing Engineering Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2004. p. 19.1-19.16.
- KAYMAK, U.; LEMKE, H. R. N. A sensitivity analysis approach to introducing weight factors into decision functions in fuzzy multicriteria decision making. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 97, p. 169-182, 1998.
- KELLEHER, J.; RINGWOOD, J. V. A computational tool for evaluating the economics of solar and wind microgeneration of electricity. **Energy**, v. 34, p. 401-409, 2009.
- KERNS, K.; MIZWICKI, S. Reinventing shell sand. **Modern Casting**. v. 97, n. 10, p. 30-33, 2007.

KRUCHTEN, P.; OBBINK, H.; STAFFORD, J. The past, present, and future for software architecture. **IEEE Software**, v. 23, n. 2, p. 22-30, 2006.

KUMAR, N. V.; GANESH, L. S. A simulation-based evaluation of the approximate and the exact eigenvector methods employed in AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 95, p. 656-662, 1996.

LAFAY, V. Advancing Eco-Friendly Binders. **Modern Casting**, v. 99, n. 10, p. 35-36, 2009.

LEE, S.; O'KEEFE, R. M. Developing a strategy for expert system verification and validation. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 24, n. 4, p. 643-655, 1994.

LENAU, T. The missing element in design for manufacture, **CIRP Annals**, v. 45, n. 1, p. 105-108, 1996.

LING, Z. Expected value method for fuzzy multiple attribute decision making. **Tsinghua Science and Technology**, v. 11, n. 1, p. 102-106, 2006.

LIU, B; XIONG, S.; XU, Q. Study on Macro and Micromodeling of the Solidification Process of Aluminum Shape Casting. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 38, n. 4, p. 525-532, 2007.

LONG, H.; MYNORS, D. J.; HOLLAND, P.; STANDRING, P. M. Forming feature representation and process selection in cold extrusion. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 125-126, p. 456-463, 2002.

LOST FOAM. **Iron casting e aluminum casting process comparison charts**. Disponível em: <[http://www.lostfoam.com/assets/content/learning\\_center/pdf/ironcasting.pdf](http://www.lostfoam.com/assets/content/learning_center/pdf/ironcasting.pdf) e [http://www.lostfoam.com/assets/content/learning\\_center/pdf/aluminumcasting.pdf](http://www.lostfoam.com/assets/content/learning_center/pdf/aluminumcasting.pdf)> Acesso em: 14 jan. 2010.

LOVATT, A. M.; SHERCLIFF, H. R. Manufacturing process selection in engineering design. Part 1: the role of process selection. **Materials and Design**, v. 19, p. 205-215, 1998a.

LOVATT, A. M.; SHERCLIFF, H. R. Manufacturing process selection in engineering design. Part 2: a methodology for creating task-based process selection procedures. **Materials and Design**, v. 19, p. 217-230, 1998b.

MAGIC PRECISION, DIE CASTING & PRECISION MANUFACTURING SOLUTIONS. **Comparison of Standard Manufacturing Processes**. Disponível em: <<http://cn.mgprecision.com/resources/mfr-process-comparisons.html>> Acesso em: 25 jun. 2010.

MAHANTI, R.; BHATTACHERJEE, V. & MUKHERJEE, S. K. Cultura da indústria de fundição sustentável, uma perspectiva ambiental. **Fundição & Matérias Primas**, v. 60, p. 10-14, 2004.

MAIA, J. L.; CERRA, A. L. & ALVES FILHO, A. G. Inter-relações entre Estratégia de Operações e Gestão da Cadeia de Suprimentos: Estudos de Caso no Segmento de Motores

para Automóveis. **Gestão & Produção**. 2005, v. 12, n. 3, p. 377-391, 2005.

MAROPOULOS, P. G.; BRADLEY, H. D.; YAO, Z. CAPABLE: an aggregate process planning system for integrated product development. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 76, p. 16-22, 1998.

MARTIN, P.; DANTAN, J. Y.; SIADAT, A. Cost Estimation and Conceptual Process Planning. In: CUNHA, P. F.; MAROPOULOS, P. G. **Digital Enterprise Technology Perspectives and Future Challenges**. New York: Springer-Verlag, 2007. p. 243-250.

MENDONZA, G. A.; MARTINS, H. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. **Forest Ecology and Management**, v. 230, p. 1-22, 2006.

METALCASTING DESIGN & PURCHASING. **Casting Alloy and Process Selector**. Disponível em: <<http://www.metalcastingvirtuallibrary.com/afscaps/caps.aspx>> Acesso em: 13 mar. 2010.

METALCASTING DESIGN. **Surface finishes for casting processes**. Disponível em <<http://www.metalcastingdesign.com/content/view/527/314/>> Acesso em 10 mar. 2010.

MODERN CASTING. 43rd Census of World Casting Production-2008. **Modern Casting**, v. 99, n. 12, p. 17-21, 2009.

MONSUUR, H. An intrinsic consistency threshold for reciprocal matrices. **European Journal of Operational Research**, v. 96, p. 387-391, 1996.

MOSQUEIRA-REY, E.; MORET-BONILLO, V.; FERNÁNDEZ-LEAL, A. An expert system to achieve fuzzy interpretations of validation data. **Expert Systems with Applications**, v. 35, p. 2089-2106, 2008.

MOSQUEIRA-REY, E.; MORET-BONILLO, V. Intelligent interpretation of validation data. **Expert Systems with Applications**, v. 23, p. 189-205, 2002.

MOSQUEIRA-REY, E.; MORET-BONILLO, V. Validation of intelligent systems: a critical study and a tool. **Expert Systems with Applications**, v. 18, p. 1-16, 2000.

NAGAHANUMAI AH.; SUBBURAJ, K.; RAVI, B. Computer aided rapid tooling process selection and manufacturability evaluation for injection mold development. **Computers in Industry**, v. 59, n. 2-3, p. 262-276, 2008.

NOH, J.; LEE, K. M. Application of multiattribute decision-making methods for the determination of relative significance factor of impact categories. **Environmental Management**, v. 31, p. 633-641, 2003.

NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION. **Magnesium Die Casting Handbook**. Wheeling: NADCA Publication #201, 2006. p. 19.

NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION. **Product Design for Die Casting**. Wheeling: NADCA Publication #E-606, 2009. p. 1-7.

O'KEEFE, R. M.; BALCI, O.; SMITH, E. P. Validating expert systems performance. **IEEE Expert**, v. 2, n. 4, p. 81-89, 1987.

O'MEARA, P.; WILE, L. E.; ARCHIBALD, J. J.; SMITH, R. L.; PIWONKA, T. S. Bonded Sand Molds. In: ASM. **Metals Handbook, v. 15 - Casting**. Metals Park: ASM International, 1988. p. 484-516.

PAHL, G.; BEITZ, W. **Engineering design: a systematic approach**. London: Springer, 2007. p. 465-515.

PARKAN, C.; WU, M. Selection of a manufacturing process with multiple benefit attributes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ENGINEERING AND TECHNOLOGY MANAGEMENT, 1996, Vancouver, Canada. **Proceedings...** Vancouver: IEEE, 1996. p. 447-452.

PELÁEZ, J. I.; LAMATA, M. T. A new measure of consistency for positive reciprocal matrices. **Computers and Mathematics with Applications**, v. 46, p. 1839-1845, 2003.

PENTZ CAST SOLUTIONS ALUMINUM FOUNDRY. **Aluminum Casting: Molding Process Comparisons**. Disponível em: <[http://www.pentzcastsolutions.com/pdf/guide\\_moldingcomparison.pdf](http://www.pentzcastsolutions.com/pdf/guide_moldingcomparison.pdf)> Acesso em: 25 jan. 2010.

PERRY, M. C. Investment casting. **Advanced Materials & Processes**. v. 166 n. 6, p. 31-33, 2008.

PERZYK, M.; MEFTAH, O. K. Selection of manufacturing process in mechanical design. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 76, p. 198-202, 1998.

PIWONKA, T. S. Aggregate Molding Materials. In: ASM. **Metals Handbook, v. 15 - Casting**. Metals Park: ASM International, 1988. p. 450-459.

RAVI, B. **Metal Casting: Computer-aided Design and Analysis**. New Delhi: Prentice-Hall of India, 2005. p. 1-17.

RAVISANKAR, V.; BALASUBRAMANIAN, V.; MURALIDHARAN, C. Selection of welding process to fabricate butt joints of high strength aluminium alloys using analytic hierarchic process. **Materials and Design**, v. 27, p. 373-380, 2006.

ROY, B. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. p. 57-69.

RUNDMAN, K. B. **Metal Casting**. Houghton: Michigan Technological University, 1999. p. 1-7

S K INDUSTRIES, INC. **Castings**. Disponível em: <<http://www.s-kinc.com/castings.htm>> Acesso em: 13 mar. 2010.



SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v.15, n. 3, p. 234-281, 1977.

SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. **Interfaces**, v.24, n. 6, p. 19-43, 1994.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. New York, London: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L.; HU, G. Ranking by eigenvector versus other methods in the Analytic Hierarchy Process. **Applied Mathematics Letters**, v. 11, n. 4, p. 121-125, 1998.

SANTOS, S. F.; FERRANTE, M. Selection methodologies of materials and manufacturing processes. **Materials Research**, v. 6, n. 4, p. 487-492, 2003.

SCHEUNEMANN, R. **Regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo Fenton**. 2005, 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Química) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Química (PPGEQ) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis.

SCHWAM, D.; WALLACE, J. F.; CHANG, Q.; ZHU, Y. **Optimization of the squeeze casting process for aluminum alloy parts**. Cleveland: Case Western Reserve University, 2002. 156 p. Relatório técnico.

SENTHIKUMARA, B.; PONNAMBALAMB, S. G.; JAWAHARC, N. Process factor optimization for controlling pull-down defects in iron castings. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 554-560, 2009.

SHERCLIFF, H. R.; LOVATT, A. M. Selection of manufacturing processes in design and role of process modelling. **Progress in Materials Science**, v. 46, p. 429-459, 2001.

SIRILERTWORAKUL, N.; WEBSTER, P. D.; DEAN, T. A. A knowledge base for alloy and process selection for casting. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 33, p. 401-416, 1993.

SQLITE. **About SQLite**. Disponível em: <<http://www.sqlite.org/about.html>> Acesso em: 14 jul. 2010.

SRDJEVIC, B. Combining different prioritization methods in the analytic hierarchy process synthesis. **Computers & Operations Research**, v. 32, p. 1897-1919, 2005.

STEIN, W. E.; MIZZI, P. J. The harmonic consistency index for the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 177, p. 488-497, 2007.

STOLL, H. W. Casting Design Issues and Practices. In: **Casting Design and Performance**. Metals Park: ASM International, 2009. p. 1-8.

SUN, X. P.; LI, Y. X.; CHEN, X. Identification and evaluation of modification level for compacted graphite cast iron. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 200, p. 471-480, 2008.

SWIFT, K. G.; BOOKER, J. D. **Process Selection from design to manufacture**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. p. 19-34.

SZEKELY, J.; BUSCH, J.; TRAPAGA, G. The Integration of Process and Cost Modeling-A Powerful Tool for Business Planning. **JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society**, v. 4, n. 12, p. 43-47, 1996.

TAI, W. S.; CHEN, C. T. A new evaluation model for intellectual capital based on computing with linguistic variable. **Expert Systems with Applications**, v. 36, p. 3483-3488, 2009.

TAVAKOLI, R.; DAVAMI, P. Optimal riser design in sand casting process by topology optimization with SIMP method I: Poisson approximation of nonlinear heat transfer equation. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 36, n. 2, p. 193-202, 2008.

THOLLANDER, P.; KARLSSON, M.; SODERSTROM, M.; CREUTZ, D. Reducing industrial energy costs through energy-efficiency measures in a liberalized European electricity market: case study of a Swedish iron foundry. **Applied Energy**, v 81, p. 115-126, 2005.

TIWARI, M. K.; BANERJEE, R. A decision support system for the selection of a casting process using analytic hierarchy process. **Production Planning & Control**, v. 12, n. 7, p. 689-694, 2001.

TORRA, V.; NARUKAWA, Y. **Modeling Decisions: Information Fusion and Aggregation Operators**. Berlin: Springer, 2007. p. 1-17.

TRIANANTAPHYLLOU, E. **Multi-Criteria Decision Making Methods: A comparative study** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. p. 1-18.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Energy and Environmental Profile of the U.S. Metalcasting Industry**, Washington, 1999.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Metal Casting Industry of the Future: Fiscal Year 2004 Annual Report**, Washington, 2005.

UNITED STATES. Department of energy. **The cast metals coalition**. Disponível em <<http://cmc.atcorp.org/datafactors.html>> Acesso em 14 jan. 2010.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2008 **Sector Performance Report. Metal Casting at a Glance 1996-2005**, Washington, 2008.

VAIDYA, O. S.; KUMAR, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. **European Journal of Operational Research**, v. 169, p. 1-29, 2006.

VIJAYARAM, T. R; SULAIMAN, S.; HAMOUDA, A. M. S.; AHMAD, M. H. M. Foundry quality aspects and prospects to reduce scrap rework and rejection in metal casting manufacturing industries. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 178, p. 39-43, 2006.

- VIJIAN, P.; ARUNACHALAM, V. P. Modelling and multi objective optimization of LM24 aluminium alloy squeeze cast process parameters using genetic algorithm. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 186, p. 82-86, 2007.
- VIJIAN, P.; ARUNACHALAM, V. P. Optimization of squeeze cast parameters of LM6 aluminium alloy for surface roughness using Taguchi method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 180, p. 161-166, 2006.
- VINARCIK, E. J. **High Integrity Die Casting Processes**. New York: John Wiley & Sons, 2003. p. 3-12.
- WANG, H. S. Application of BPN with feature-based models on cost estimation of plastic injection products. **Computers & Industrial Engineering**, v. 53, p. 79-94, 2007.
- WANG, Y. M.; PARKAN, C.; LUO, Y. A linear programming method for generating the most favorable weights from pairwise comparison matrix. **Computers & Operations Research**, v. 35, p. 3918-3930, 2008.
- WILLIAMS, G. W. Comparing the joint agreement of several raters with another rater. **Biometrics**, v. 32, p. 619-627, 1976.
- YOON, K.; HWANG, C. L. **Multiple attribute decision making: an introduction**. Thousand Oaks: Sage Publications, 1995. p. 15-16.
- YU, J. C.; KRIZAN, S.; ISHII, K. Computer-aided design for manufacturing process selection, **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 4, p. 199-208, 1993.
- ZANETTI, M. C.; FIORE, S. Foundry processes: the recovery of green moulding sands for core operations. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 38, p. 243-254, 2002.
- ZHA, X. F. A web-based advisory system for process and material selection in concurrent product design for a manufacturing environment. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 25, p. 233-243, 2005.
- ZHANG, Y. F.; FUH, J. Y. H. A neural network approach for early cost estimation of packaging products. **Computers & Industrial Engineering**, v. 34, p. 433-450, 1998.

APÊNDICE A – INFORMAÇÕES DOS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO DE  
METAIS EMPREGADAS NO APLICATIVO COMPUTACIONAL DO MMSPF COMO  
FONTES DE INFORMAÇÃO

## Fontes de Informação para o Critério 1 - Peso componente (kg)

Fonte	Areia verde – manual (P1)				Areia verde – mecanizada (P2)				Areia verde – automatizada (P3)				Areia silicato – CO <sub>2</sub> (P4)				Areia com resina – cura frio (P5)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	0,11	0,45	90	450	0,11	0,45	90	450	0,11	0,45	90	450	0,09	0,22	68	45000	0,09	0,22	68	45000
2			900	900			900	900			900	900	0,22	0,22	2000	2000	0,22	0,22	2000	2000
5					0,05	1	100	800	0,01	20	110	400								

Fonte	Areia com resina – <i>shell molding</i> (P6)				Processo molde de gesso (P7)				Processo molde cerâmico (P8)				<i>Investment casting</i> (P9)				Processo molde cheio - <i>lost foam</i> (P10)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	0,02	0,04	11,3	22,6	0,02	0,09	6,8	1000	0,04	0,45	11,3	34	0,004	0,04	6,8	115	0,04	0,45	34	68
2	0,03	0,03	115	115									0,03	0,03	45	45				
3	0,01	0,01	100	100	0,01	0,01	50	50					0,001	0,001	100	100	0,01	0,01	100	100
4	0,01	0,01	20	100	0,025	0,025	50	100	0,1	0,1	50	3000	5.10 <sup>-4</sup>	5.10 <sup>-4</sup>	5	100				
6					0,01	0,01	34	1815												

Fonte	Fundição centrífuga - molde metálico (P11)				Molde permanente - gravidade (P12)				Molde permanente - baixa pressão (P13)				Fundição sob pressão - <i>die casting</i> (P14)				<i>Squeeze casting</i> (P15)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	0,9	2,3	68	13500	0,04	0,22	45	68	0,04	0,22	45	68	0,02	0,09	6,8	35				
2					0,1	0,1	45	45	0,1	0,1	45	45	0,1	0,1	40	40				
3	0,01	0,01	5000	5000	0,1	0,1	300	300	0,1	0,1	300	300	0,01	0,01	50	50				
4	0,01	0,01	5000	5000	0,05	0,05	5	300	0,05	0,05	5	300	0,01	0,01	50	100	0,025	0,025	4,5	4,5
6																	0,1	0,1	29,5	29,5
7																	0,11	0,11	14	14

FONTE: (1) METALCASTING DESIGN & PURCHASING (2010); (2) JORSTAD (2008); (1998); (3) KALPAKJIAN E SCHMID (2009); (4) SWIFT E BOOKER (2003); (5) ABIFA (2009); (6) DORCIC E VERMA (1988); (7) NADCA (2009).

## Fontes de Informação para o Critério 2 - Maior dimensão (mm)

Fonte	Areia verde – manual (P1)				Areia verde – mecanizada (P2)				Areia verde – automatizada (P3)				Areia silicato – CO <sub>2</sub> (P4)				Areia com resina – cura frio (P5)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1			150	150			150	150			150	150			150	150			150	150
2			5000	5000											5000	10000			5000	5000
3			10000	10000			650	650			450	450			20000	20000			10000	10000
4			20000	20000			1500	1500			1000	1000							20000	20000

Fonte	Areia com resina – <i>shell molding</i> (P6)				Processo molde de gesso (P7)				Processo molde cerâmico (P8)				<i>Investment casting</i> (P9)				Processo molde cheio - <i>lost foam</i> (P10)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1			150	150			2500	2500			600	600			250	250			250	250
2			1000	1000			500	500			1000	1000			500	500			500	500
3															500	500			500	500
6																			610	610

Fonte	Fundição centrífuga - molde metálico (P11)				Molde permanente - gravidade (P12)				Molde permanente - baixa pressão (P13)				Fundição sob pressão - <i>die casting</i> (P14)				<i>Squeeze casting</i> (P15)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1			300	300			150	150			150	150			150	150				
2			15000	15000			1000	1000			1000	1000			1000	1000				
3							800	800			800	800			500	500				
4															500	500				
5																			500	500
7																			423	423

FONTES: (1) METALCASTING DESIGN & PURCHASING (2010); (2) SWIFT E BOOKER (2003); (3) RAVI (2005); (4) ABIFA (2009); (5) SCHWAN *et al.* (2002); (6) AMERICAN FOUNDRY SOCIETY (2010);

## Fontes de Informação para o Critério 3 - Maior espessura seção (mm)

Fonte	Areia verde – manual (P1)				Areia verde – mecanizada (P2)				Areia verde – automatizada (P3)				Areia silicato – CO <sub>2</sub> (P4)				Areia com resina – cura frio (P5)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
3			150	150			150	150			150	150			900	900			900	900

Fonte	Areia com resina – <i>shell molding</i> (P6)				Processo molde de gesso (P7)				Processo molde cerâmico (P8)				<i>Investment casting</i> (P9)				Processo molde cheio - <i>lost foam</i> (P10)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1															75	75				
2			50	50											75	75				
3			38	38			25	25			25	25			50	50			50	50

Fonte	Fundição centrífuga - molde metálico (P11)				Molde permanente - gravidade (P12)				Molde permanente - baixa pressão (P13)				Fundição sob pressão - <i>die casting</i> (P14)				<i>Squeeze casting</i> (P15)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1			100	100			50	50			50	50			12	12				
2			125	125			50	50			50	50			13	13			200	200
3			125	125			75	75			75	75			19	19				

FONTE: (1) KALPAKJIAN E SCHMID (2009); (2) SWIFT E BOOKER (2003); (3) METALCASTING DESIGN & PURCHASING (2010).

## Fontes de Informação para o Critério 4 - Menor espessura seção (mm)

Fonte	Areia verde – manual (P1)				Areia verde – mecanizada (P2)				Areia verde – automatizada (P3)				Areia silicato – CO <sub>2</sub> (P4)				Areia com resina – cura frio (P5)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	2,5	2,5			2,5	2,5			2,5	2,5			2,5	2,5			2,5	2,5		
2	6,3	6,3			6,3	6,3			6,3	6,3			6,3	6,3			6,3	6,3		
3	3	3			3	3			3	3			3	3			3	3		
4	3	6			3	6			3	6			3	6			3	6		

Fonte	Areia com resina – <i>shell molding</i> (P6)				Processo molde de gesso (P7)				Processo molde cerâmico (P8)				<i>Investment casting</i> (P9)				Processo molde cheio - <i>lost foam</i> (P10)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	2,5	2,5							1,6	1,6			1,6	1,6						
2	3,2	3,2			1,8	1,8							1,5	1,5			3,8	3,8		
3	2	2			1	1							1	1			2	2		
4	1,5	1,5			0,8	1,8			0,6	1,2			1	2						

Fonte	Fundição centrífuga - molde metálico (P11)				Molde permanente - gravidade (P12)				Molde permanente - baixa pressão (P13)				Fundição sob pressão - <i>die casting</i> (P14)				<i>Squeeze casting</i> (P15)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1					3,2	3,2			3,2	3,2			0,8	0,8						
2					4,8	4,8			4,8	4,8			0,8	0,8						
3	2	2			2	2			2	2			0,5	0,5						
4	2,5	8			2	2			2	2			0,4	1,5			6	6		
5																	3	3		

FONTE: (1) KAY (2004); (2) LOST FOAM (2010); (3) KALPAKJIAN E SCHMID (2009); (4) SWIFT E BOOKER (2003); (5) VINARCIK (2003).



## Fontes de Informação para o Critério 5 - Ângulo extração mínimo (°)

Fonte	Areia verde – manual (P1)				Areia verde – mecanizada (P2)				Areia verde – automatizada (P3)				Areia silicato – CO <sub>2</sub> (P4)				Areia com resina – cura frio (P5)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	2	2											1	1			1	1		
2	3	4			2	3			0,5	1,5			1	2			1	2		
3	1	1			1	1			1	1			1	1			1	1		

Fonte	Areia com resina – <i>shell molding</i> (P6)				Processo molde de gesso (P7)				Processo molde cerâmico (P8)				<i>Investment casting</i> (P9)				Processo molde cheio - <i>lost foam</i> (P10)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	0	0			0,5	0,5			0,5	0,5			0	0			0	0		
2	0,25	1			0,5	1			0,5	1			0,125	0,25						
3	0,25	1			0,5	2			0,1	1			0	0,5						
4																	0	0,25		

Fonte	Fundição centrífuga - molde metálico (P11)				Molde permanente - gravidade (P12)				Molde permanente - baixa pressão (P13)				Fundição sob pressão - <i>die casting</i> (P14)				<i>Squeeze casting</i> (P15)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	0	0			1	1			1	1			0,25	0,25						
2	0	0			1	2			1	2			0,5	1						
3	1	1			2	2			2	2			0,25	3			0,1	3		

FONTE: (1) METALCASTING DESIGN & PURCHASING (2010); (2) BRALLA (1986); (3) SWIFT E BOOKER (2003); (4) LOST FOAM (2010).

Fontes de Informação para o Critério 6 - Rugosidade superficial máxima Ra ( $\mu\text{m}$ )

Fonte	Areia verde – manual (P1)				Areia verde – mecanizada (P2)				Areia verde – automatizada (P3)				Areia silicato – CO <sub>2</sub> (P4)				Areia com resina – cura frio (P5)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	2,3	5,6	19,9	50	2,3	5,6	19,9	25	2,3	5,6	19,9	25	0,9	3,4	13,3	25	0,9	3,4	13,3	25
2	6,5	15	15	50																
3	4,5	1,5	12,2	12,2	4,5	4,5	12,2	12,2	4,5	4,5	12,2	12,2								
4	2,8	2,8	8,9	8,9					4,5	4,5	8,9	8,9	4,5	4,5	11,1	11,1	4,5	4,5	11,1	11,1
5	5	5	25	25	5	5	25	25					5	5	25	25	5	5	25	25
6	3,2	3,2	50	50	3,2	3,2	50	50	3,2	3,2	50	50	3,2	3,2	50	50	3,2	3,2	50	50
Fonte	Areia com resina – <i>shell molding</i> (P6)				Processo molde de gesso (P7)				Processo molde cerâmico (P8)				<i>Investment casting</i> (P9)				Processo molde cheio - <i>lost foam</i> (P10)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	0,9	1,7	3,4	12,5	0,6	0,9	2,8	6,3	0,6	1,4	3,9	12,5	0,8	1,2	2,8	12,5	2,3	2,8	3,9	12,5
2	0,8	1,8	1,8	12,5									0,4	2,1	2,1	6,3	1,4	2,8	5,6	7,8
3	4,5	4,5	7,8	7,8	1,4	1,4	2,8	2,8					1,4	1,4	5,6	5,6				
4													0,3	0,3	1,9	1,9				
5	1	1	3	3	1	1	2	2					0,3	0,3	2	2	5	5	25	25
6	0,8	0,8	12,5	12,5	0,8	0,8	3,2	3,2	0,8	0,8	6,3	6,3	0,4	0,4	6,3	6,3				
Fonte	Fundição centrífuga - molde metálico (P11)				Molde permanente - gravidade (P12)				Molde permanente - baixa pressão (P13)				Fundição sob pressão - <i>die casting</i> (P14)				<i>Squeeze casting</i> (P15)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	2,3	10	11,1	25	4	5,6	9,3	12,5	3,6	5,6	8,9	12,5	0,5	2	4,5	12,5	0,5	2	4,5	12,5
2					0,8	1,9	1,9	6,3	0,8	1,9	1,9	6,3	0,4	0,9	0,9	3,2				
3					3,4	3,4	6,7	6,7	3,4	3,4	6,7	6,7	0,8	0,8	1,4	1,4				
4					2,3	2,3	11,1	11,1	2,3	2,3	11,1	11,1	0,8	0,8	1,4	1,4				
5	2	2	10	10	2	2	6	6	2	2	6	6	1	1	2	2				
6	1,6	1,6	12,5	12,5	0,8	0,8	6,3	6,3	0,8	0,8	6,3	6,3	0,4	0,4	3,2	3,2	1,6	1,6	12,5	12,5

FONTES: (1) METALCASTING DESIGN; (2) LOST FOAM (2010); (3) AKARTE *et al.* (1999); (4) PENTZ CAST SOLUTIONS ALUMINUM FOUNDRY (2010); (5) KALPAKJIAN E SCHMID (2009); (6) SWIFT E BOOKER (2003).

## Fontes de Informação para o Critério 8 - Complexidade de forma (valor de variável linguística)

Fonte	Areia verde – manual (P1)				Areia verde – mecanizada (P2)				Areia verde – automatizada (P3)				Areia silicato – CO <sub>2</sub> (P4)				Areia com resina – cura frio (P5)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	0	0	0,75	1	0	0	0,75	1	0	0	0,75	1	0	0	0,75	1	0	0	0,75	1
2	0	0	0,5	0,75	0	0	0,5	0,75	0	0	0,5	0,75	0	0	0,75	0,75	0	0	0,75	0,75
3	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1

Fonte	Areia com resina – shell molding (P6)				Processo molde de gesso (P7)				Processo molde cerâmico (P8)				Investment casting (P9)				Processo molde cheio - lost foam (P10)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	0	0	0,5	0,75	0	0	0,75	1	0	0	0,75	1	0	0	1	1	0	0	0,75	1
2	0	0	0,75	0,75					0	0	1	1	0	0	1	1				
3	0	0	1	1	0	0	0,5	1	0	0	1	1	0	0	1	1				
4																	0	0	0,95	0,95

Fonte	Fundição centrífuga - molde metálico (P11)				Molde permanente - gravidade (P12)				Molde permanente - baixa pressão (P13)				Fundição sob pressão - die casting (P14)				Squeeze casting (P15)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	0	0	0,25	0,5	0	0	0,5	0,75	0	0	0,5	0,75	0	0	0,25	0,5				
2					0	0	0,5	0,5	0	0	0,5	0,5	0	0	0,75	0,75				
3	0	0	0,25	0,25	0	0	0,75	0,75	0	0	0,75	0,75	0	0	0,75	1	0	0	0,75	1
4					0	0	0,45	0,45	0	0	0,45	0,45	0	0	0,6	0,6				

FONTE: (1) KALPAKJIAN E SCHMID (2009); (2) KAY (2004); (3) SWIFT E BOOKER (2003); (4) LOST FOAM (2010);

## Fontes de Informação para o Critério 9 - Tolerância dimensional (mm)

Fonte	Areia verde – manual (P1)				Areia verde – mecanizada (P2)				Areia verde – automatizada (P3)				Areia silicato – CO <sub>2</sub> (P4)				Areia com resina – cura frio (P5)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	0,9	2,2	2,2	6	0,5	1,3	2	5	0,3	0,7	2	4,5	0,3	0,7	2	4,5	0,3	0,7	2	4,5
2	0,5	0,76	1,14	3,04	0,5	0,76	1,14	3,04	0,5	0,76	1,14	3,04	0,25	0,5	1,27	3,04	0,25	0,5	1,27	3,04
3	0,6	2,3	2,3	3,8	0,6	2,3	2,3	3,8	0,6	2,3	2,3	3,8	0,6	2,3	2,3	3,8	0,6	2,3	2,3	3,8

Fonte	Areia com resina – <i>shell molding</i> (P6)				Processo molde de gesso (P7)				Processo molde cerâmico (P8)				<i>Investment casting</i> (P9)				Processo molde cheio - <i>lost foam</i> (P10)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	0,4	0,7	1,2	1,8	0,15	0,15	0,5	0,5	0,15	0,5	0,5	0,7	0,08	0,25	0,25	0,6				
2	0,25	0,5	1,27	2,03	0,25	0,25	0,6	0,6	0,25	0,65	0,65	1,52	0,12	0,25	0,25	1,27	0,38	0,9	0,9	1,05
3	0,6	2,3	2,3	3,8	0,12	0,12	1,5	1,5	0,1	0,78	0,78	1,56	0,08	0,4	0,8	1,5	0,6	2,3	2,3	3,8

Fonte	Fundição centrífuga - molde metálico (P11)				Molde permanente - gravidade (P12)				Molde permanente - baixa pressão (P13)				Fundição sob pressão - <i>die casting</i> (P14)				<i>Squeeze casting</i> (P15)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1					0,3	0,65	1,05	1,75	0,3	0,65	1,05	1,75	0,15	0,5	0,9	1,25	0,15	0,3	0,3	0,6
2	1,27	2,5	2,5	3,81	0,63	1,27	1,27	2,38	0,22	0,88	0,88	2,38	0,12	0,9	0,9	2				
3	0,5	0,8	0,8	1,5	0,4	0,5	0,7	1,1	0,4	0,5	0,7	1,1	0,08	0,35	0,73	1,31				
4																	0,15	0,25	0,6	0,6

FONTES: (1) SWIFT E BOOKER (2003); (2) METALCASTING DESIGN & PURCHASING (2010); (3) BRALLA (2006); (4) GHOMASHCHI E VIKHROV (2000).

Fontes de Informação para o Critério 10 - Tamanho lote anual (unidades)

Fonte	Areia verde – manual (P1)				Areia verde – mecanizada (P2)				Areia verde – automatizada (P3)				Areia silicato – CO <sub>2</sub> (P4)				Areia com resina – cura frio (P5)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	1	1	100	1000	100	100	1. 10 <sup>4</sup>	1. 10 <sup>5</sup>	1000	1000	1. 10 <sup>5</sup>	2. 10 <sup>6</sup>								
2	1	1	1. 10 <sup>5</sup>	1. 10 <sup>5</sup>	1	1	1. 10 <sup>5</sup>	1. 10 <sup>5</sup>	1	1	2. 10 <sup>6</sup>	2. 10 <sup>6</sup>	1	1	1. 10 <sup>5</sup>	1. 10 <sup>5</sup>	1	1	1. 10 <sup>5</sup>	1. 10 <sup>5</sup>
3	1	1											1	1			1	1		

Fonte	Areia com resina – shell molding (P6)				Processo molde de gesso (P7)				Processo molde cerâmico (P8)				Investment casting (P9)				Processo molde cheio - lost foam (P10)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	100	1000	1. 10 <sup>4</sup>	1. 10 <sup>5</sup>	1	1	100	1000	1	1	100	1. 10 <sup>4</sup>	10	10	1000	1000				
2													1	1	1000	1000				
3	100	100			10	10							10	10			500	500		
4	1000	1000			1	1	250	250					1	1	1000	1000				
5	100	100															5000	5000	2. 10 <sup>4</sup>	2. 10 <sup>4</sup>
6													1	1	1200	1. 10 <sup>4</sup>				

Fonte	Fundição centrífuga - molde metálico (P11)				Molde permanente - gravidade (P12)				Molde permanente - baixa pressão (P13)				Fundição sob pressão - die casting (P14)				Squeeze casting (P15)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	1	100	1000	1. 10 <sup>4</sup>	1000	1. 10 <sup>4</sup>	1. 10 <sup>5</sup>	1. 10 <sup>5</sup>	1000	1. 10 <sup>4</sup>	1. 10 <sup>5</sup>	1. 10 <sup>5</sup>	1. 10 <sup>4</sup>	1. 10 <sup>4</sup>	1. 10 <sup>5</sup>	1. 10 <sup>6</sup>	1. 10 <sup>4</sup>	1. 10 <sup>4</sup>	1. 10 <sup>5</sup>	1. 10 <sup>5</sup>
2					2000	2000			2000	2000			5. 10 <sup>3</sup>	5. 10 <sup>3</sup>						
3	10	10	1. 10 <sup>4</sup>	1. 10 <sup>4</sup>	1000	1000			1000	1000			1. 10 <sup>4</sup>	1. 10 <sup>4</sup>						
4					500	500			500	500			2500	2500						
5					100	100							1000	1000						
6	400	400			2500	2500	4. 10 <sup>4</sup>	1. 10 <sup>5</sup>	4000	4000	4. 10 <sup>4</sup>	1. 10 <sup>5</sup>	5. 10 <sup>3</sup>	1. 10 <sup>4</sup>	1. 10 <sup>6</sup>	1. 10 <sup>6</sup>				

FONTE: (1) SWIFT E BOOKER (2003); (2) PENTZ CAST SOLUTIONS ALUMINUM FOUNDRY (2010); (3) KALPAKJIAN E SCHMID (2009); (4) LOST FOAM (2010); (5) DAWS *et al.* (2008); (6) BRALLA (1986).

Fontes de Informação para o Critério 11- *Lead time* (dias)

Fonte	Areia verde – manual (P1)				Areia verde – mecanizada (P2)				Areia verde – automatizada (P3)				Areia silicato – CO <sub>2</sub> (P4)				Areia com resina – cura frio (P5)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	15	15	45	45									15	15	45	45	15	15	45	45
2	10	10	40	40									10	10	40	40	10	10	40	40
3	10	10	30	30									15	15	45	45	15	15	45	45
4	60	60	90	90	60	60	90	90	60	60	90	90	60	60	90	90	60	60	90	90
5					30	30	75	75	30	30	75	75								

Fonte	Areia com resina – <i>shell molding</i> (P6)				Processo molde de gesso (P7)				Processo molde cerâmico (P8)				<i>Investment casting</i> (P9)				Processo molde cheio - <i>lost foam</i> (P10)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1	60	60	90	90	30	30	60	60					60	60	90	90	45	45	135	135
2					10	10	40	40					40	40	90	90				
3	30	30	75	75	15	15	40	40	120	120	240	240	60	60	120	120	120	120	400	400
4	60	60	90	90									60	60	90	90	60	60	90	90
5									60	60	120	120								

Fonte	Fundição centrífuga - molde metálico (P11)				Molde permanente - gravidade (P12)				Molde permanente - baixa pressão (P13)				Fundição sob pressão - <i>die casting</i> (P14)				<i>Squeeze casting</i> (P15)			
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
1					60	60	150	150	60	60	150	150	75	75	135	135				
2					75	75	90	90	75	75	90	90	30	30	45	45				
3	30	30	60	60	90	90	300	300	100	100	320	320	120	120	360	360				
4					60	60	90	90	60	60	90	90	60	60	90	90				
5	45	45	120	120													60	60	150	150
6																	75	75	135	135

FONTE: (1) LOST FOAM (2010); (2) MAGIC PRECISION, DIE CASTING & PRECISION MANUFACTURING SOLUTIONS (2010); (3) METALCASTING DESIGN & PURCHASING (2010); (4) S K INDUSTRIES, INC. (2010); (5) SWIFT E BOOKER (2003); (6) GHOMASHCHI E VIKHROV (2000).

Fontes de Informação para os Critério 12 e 13 – Nível relativo de porosidade e propriedades mecânicas (valor de variável linguística)

Quadro A1 – Fontes de Informação para o critério de nível relativo de porosidade

Processos de Fundição		Fonte (1)	Fonte (2)	Fonte (3)	Fonte (4)	Fonte (5)
P1	Areia Verde – Manual	0,33	0,33	0,25	0,45	-
P2	Areia Verde – Mecanizada	0,33	0,33	-	0,45	-
P3	Areia Verde – Automatizada	0,33	0,33	-	0,45	-
P4	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>	0,33	0,33	-	0,45	-
P5	Areia com Resina – Cura frio	0,33	0,33	-	0,45	-
P6	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>	0,25	0,5	-	0,6	-
P7	Processo Molde de Gesso	0,25	0,41	-	-	-
P8	Processo Molde Cerâmico	-	0,83	-	-	-
P9	<i>Investment Casting</i>	0,17	0,5	0,5	-	-
P10	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>	0,33	-	-	0,85	0,25
P11	Fundição Centrífuga - Molde Metálico	0,87	0,83	0,87	-	-
P12	Molde Permanente - Gravidade	0,58	0,75	-	0,9	-
P13	Molde Permanente - Baixa Pressão	0,58	0,75	-	0,9	-
P14	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>	0,67	0,75	-	0,2	-
P15	<i>Squeeze Casting</i>	-	1	1	-	-

FONTE: (1) KALPAKJIAN E SCHMID (2009); (2) SWIFT E BOOKER (2003); (3) DAWS *et al.* (2008); (4) LOST FOAM (2010); (5) BEELEY (2001b).

Quadro A2 – Fontes de Informação para o critério de nível relativo de propriedades mecânicas

Processos de Fundição		Fonte (1)	Fonte (2)	Fonte (3)	Fonte (4)
P1	Areia Verde – Manual	0,75	0,33	0,67	-
P2	Areia Verde – Mecanizada	0,75	0,33	0,67	-
P3	Areia Verde – Automatizada	0,75	0,33	0,67	-
P4	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>	0,75	0,33	0,67	-
P5	Areia com Resina – Cura frio	0,75	0,33	0,67	-
P6	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>	0,75	0,67	-	-
P7	Processo Molde de Gesso	0,5	0,5	0,33	-
P8	Processo Molde Cerâmico	0,5	0,83	-	-
P9	<i>Investment Casting</i>	0,5	0,83	-	-
P10	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>	-	-	-	0,5
P11	Fundição Centrífuga - Molde Metálico	-	0,83	-	-
P12	Molde Permanente - Gravidade	0,75	0,58	-	-
P13	Molde Permanente - Baixa Pressão	0,75	0,58	-	-
P14	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>	1	0,75	0,83	-
P15	<i>Squeeze Casting</i>	-	1	1	-

FONTE: (1) JORSTAD (2008); (2) SWIFT E BOOKER (2003); (3) DAWS *et al.* (2008); (4) BEELEY (2001b).

INSTRUMENTO UTILIZADO NA OBTENÇÃO DE DADOS DO GRUPO DE CRITÉRIOS DE  
IMPACTO AMBIENTAL

Em relação aos critérios ambientais de emissões gasosas e toxidez dos resíduos gerados, e com base no conjunto de variáveis lingüísticas apresentados abaixo. Classifique os processos de fundição de metais, apresentados na tabela abaixo, de acordo com sua opinião.

Nenhum (a)		Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto	Perfeito (a)
Processos de Fundição		Emissões Gasosas			Toxidez dos Resíduos Gerados		
<b>P1</b>	Areia Verde – Manual						
<b>P2</b>	Areia Verde – Mecanizada						
<b>P3</b>	Areia Verde – Automatizada						
<b>P4</b>	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>						
<b>P5</b>	Areia com Resina – Cura frio						
<b>P6</b>	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>						
<b>P7</b>	Processo Molde de Gesso						
<b>P8</b>	Processo Molde Cerâmico						
<b>P9</b>	<i>Investment Casting</i>						
<b>P10</b>	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>						
<b>P11</b>	Fundição Centrífuga - Molde Metálico						
<b>P12</b>	Molde Permanente - Gravidade						
<b>P13</b>	Molde Permanente - Baixa Pressão						
<b>P14</b>	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>						
<b>P15</b>	<i>Squeeze Casting</i>						



Fontes de Informação para os Critério 14 e 15 – Emissões gasosas e toxidez dos resíduos gerados  
(variável linguística)

Quadro A3 – Fontes de Informação para o critério de emissões gasosas

Processos de Fundição		Fonte (1)	Fonte (2)	Fonte (3)
<b>P1</b>	Areia Verde – Manual	Baixo	Muito Alto	Alto
<b>P2</b>	Areia Verde – Mecanizada	Baixo	Muito Alto	Alto
<b>P3</b>	Areia Verde – Automatizada	Médio	Muito Alto	Alto
<b>P4</b>	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>	Muito Alto	Médio	Alto
<b>P5</b>	Areia com Resina – Cura frio	Muito Baixo	Médio	Muito Baixo
<b>P6</b>	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>	Muito Baixo	Médio	Muito Baixo
<b>P7</b>	Processo Molde de Gesso	Muito Alto	Médio	Muito Alto
<b>P8</b>	Processo Molde Cerâmico	Muito Alto	Médio	Muito Alto
<b>P9</b>	<i>Investment Casting</i>	Médio	Alto	Muito Alto
<b>P10</b>	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>	Baixo	Baixo	Médio
<b>P11</b>	Fundição Centrífuga - Molde Metálico	Muito Alto	Médio	Muito Alto
<b>P12</b>	Molde Permanente - Gravidade	Muito Alto	Médio	Muito Alto
<b>P13</b>	Molde Permanente - Baixa Pressão	Muito Alto	Médio	Muito Alto
<b>P14</b>	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>	Alto	Médio	Alto
<b>P15</b>	<i>Squeeze Casting</i>	Alto	Médio	Muito Alto

FONTE: (1) ESPECIALISTA A; (2) ESPECIALISTA B; (3) ESPECIALISTA C.

Quadro A4 – Fontes de Informação para o critério de toxidez dos resíduos gerados

Processos de Fundição		Fonte (1)	Fonte (2)	Fonte (3)
<b>P1</b>	Areia Verde – Manual	Alto	Perfeito	Alto
<b>P2</b>	Areia Verde – Mecanizada	Alto	Perfeito	Alto
<b>P3</b>	Areia Verde – Automatizada	Alto	Perfeito	Alto
<b>P4</b>	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>	Alto	Alto	Médio
<b>P5</b>	Areia com Resina – Cura frio	Muito Baixo	Baixo	Muito Baixo
<b>P6</b>	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>	Baixo	Baixo	Muito Baixo
<b>P7</b>	Processo Molde de Gesso	Muito Alto	Médio	Alto
<b>P8</b>	Processo Molde Cerâmico	Muito Alto	Médio	Alto
<b>P9</b>	<i>Investment Casting</i>	Alto	Médio	Alto
<b>P10</b>	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>	Médio	Baixo	Médio
<b>P11</b>	Fundição Centrífuga - Molde Metálico	Perfeito	Médio	Muito Alto
<b>P12</b>	Molde Permanente - Gravidade	Perfeito	Médio	Muito Alto
<b>P13</b>	Molde Permanente - Baixa Pressão	Perfeito	Médio	Muito Alto
<b>P14</b>	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>	Perfeito	Médio	Muito Alto
<b>P15</b>	<i>Squeeze Casting</i>	Perfeito	Médio	Muito Alto

FONTE: (1) ESPECIALISTA A; (2) ESPECIALISTA B; (3) ESPECIALISTA C.

APÊNDICE B – RESULTADOS COMPLETOS DA ETAPA DE  
CLASSIFICAÇÃO TÉCNICA

Quadro B1 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação um para cenários 1 a 8

Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7		Cenário 8	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P4	0,144	P2	0,128	P4	0,115	P2	0,111	P4	0,146	P2	0,134	P4	0,124	P2	0,119
P2	0,141	P4	0,125	P2	0,113	P4	0,108	P2	0,144	P4	0,131	P2	0,123	P4	0,117
P5	0,135	P3	0,123	P5	0,109	P3	0,107	P5	0,140	P5	0,108	P5	0,119	P8	0,103
P3	0,130	P1	0,101	P3	0,106	P11	0,100	P1	0,110	P1	0,108	P8	0,103	P5	0,098
P1	0,101	P5	0,094	P11	0,094	P12	0,095	P3	0,103	P3	0,105	P1	0,096	P1	0,098
						P8	0,093			P8	0,092	P3	0,091	P11	0,095
						P13	0,091							P3	0,095
<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,650</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,573</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,538</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,706</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,643</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,679</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,657</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,725</b>

Quadro B2 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação um para cenários 9 a 16

Cenário 9		Cenário 10		Cenário 11		Cenário 12		Cenário 13		Cenário 14		Cenário 15		Cenário 16	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P2	0,119	P2	0,111	P11	0,139	P11	0,132	P2	0,134	P2	0,124	P8	0,132	P8	0,125
P4	0,117	P11	0,107	P8	0,126	P8	0,118	P4	0,133	P4	0,118	P11	0,118	P11	0,118
P8	0,103	P8	0,103	P12	0,104	P12	0,109	P5	0,124	P8	0,117	P2	0,109	P2	0,107
P5	0,098	P3	0,103	P13	0,102	P13	0,108	P8	0,124	P1	0,110	P4	0,108	P4	0,103
P1	0,098	P4	0,102			P2	0,093	P1	0,113	P11	0,097	P5	0,102	P1	0,096
P3	0,095	P1	0,100									P1	0,094		
P11	0,095	P12	0,100												
		P13	0,098												
<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,725</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,824</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,472</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,562</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,629</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,565</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,663</b>	<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,550</b>

Quadro B3 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação dois para cenários 1 a 8

Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7		Cenário 8	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P4	0,114	P4	0,098	P4	0,089	P15	0,085	P4	0,115	P4	0,103	P4	0,096	P4	0,090
P5	0,107	P3	0,094	P15	0,086	P4	0,083	P5	0,110	P2	0,099	P5	0,092	P2	0,087
P2	0,101	P2	0,093	P5	0,084	P3	0,080	P2	0,107	P5	0,085	P2	0,089	P11	0,084
P3	0,100	P5	0,075	P6	0,084	P2	0,079	P6	0,083	P3	0,080	P11	0,083	P8	0,079
P6	0,097	P12	0,073	P2	0,080	P11	0,076	P3	0,079	P11	0,075	P8	0,079	P5	0,076
		P6	0,069	P3	0,079	P12	0,076	P8	0,073	P8	0,074	P6	0,076	P3	0,072
		P13	0,069	P11	0,071	P13	0,073	P11	0,070	P1	0,071	P3	0,069	P15	0,070
		P1	0,068	P12	0,071	P8	0,072	P1	0,070	P9	0,067	P15	0,067		
				P8	0,070			P9	0,068						
				P13	0,068										
<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,519</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,638</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,782</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,624</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,774</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,655</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,652</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,557</b>

Quadro B4 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação dois para cenários 9 a 16

Cenário 9		Cenário 10		Cenário 11		Cenário 12		Cenário 13		Cenário 14		Cenário 15		Cenário 16	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P4	0,090	P11	0,087	P15	0,120	P15	0,107	P4	0,103	P11	0,097	P11	0,108	P11	0,103
P2	0,087	P2	0,082	P11	0,103	P11	0,098	P2	0,102	P2	0,094	P8	0,095	P8	0,091
P11	0,084	P4	0,078	P8	0,089	P8	0,085	P11	0,101	P4	0,091	P15	0,084	P15	0,083
P8	0,079	P8	0,078	P12	0,075	P12	0,080	P5	0,097	P8	0,088	P4	0,082	P2	0,080
P5	0,076	P12	0,077	P13	0,074	P13	0,079	P8	0,093	P9	0,082	P2	0,081	P4	0,078
P3	0,072	P3	0,077			P14	0,069	P9	0,090	P1	0,074	P5	0,077	P9	0,073
P15	0,070	P15	0,076			P2	0,067	P1	0,073	P5	0,068	P9	0,076		
		P13	0,075												
		P1	0,071												
<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,557</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,701</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,461</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,586</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,659</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,593</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,601</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,508</b>

Quadro B5 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação três para cenários 1 a 8

Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7		Cenário 8	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P4	0,180	P2	0,184	P4	0,164	P2	0,171	P4	0,180	P2	0,183	P4	0,168	P2	0,173
P2	0,178	P3	0,181	P2	0,162	P3	0,168	P2	0,179	P4	0,177	P2	0,167	P4	0,168
P3	0,165	P4	0,176	P3	0,154	P4	0,165	P5	0,168	P3	0,151	P5	0,159	P3	0,147
P5	0,162	P1	0,151	P5	0,152	P1	0,143								
<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,684</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,691</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,632</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,647</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,528</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,512</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,494</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,488</b>

Quadro B6 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação três para cenários 9 a 16

Cenário 9		Cenário 10		Cenário 11		Cenário 12		Cenário 13		Cenário 14		Cenário 15		Cenário 16	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P2	0,173	P2	0,184	P2	0,152	P2	0,167	P2	0,177	P2	0,183	P2	0,162	P2	0,170
P4	0,168	P3	0,180	P6	0,152	P3	0,164	P4	0,175	P4	0,173	P4	0,160	P4	0,162
P3	0,147	P4	0,169	P4	0,150	P4	0,156	P9	0,157	P9	0,161	P9	0,158	P9	0,160
		P1	0,167	P9	0,146	P9	0,154	P5	0,157	P1	0,149	P5	0,148		
		P9	0,151			P1	0,152								
<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,488</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,851</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,599</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,792</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,666</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,667</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,628</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,493</b>

Quadro B7 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação quatro para cenários 1 a 8

Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7		Cenário 8	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P8	0,125	P8	0,127	P8	0,149	P8	0,145	P8	0,13	P8	0,131	P8	0,147	P8	0,144
P9	0,110	P12	0,115	P12	0,121	P12	0,129	P9	0,122	P2	0,122	P9	0,114	P9	0,114
P4	0,108	P2	0,113	P9	0,103	P9	0,105	P4	0,121	P9	0,12	P4	0,109	P2	0,112
P2	0,104	P1	0,111			P2	0,103	P2	0,119	P4	0,119	P2	0,107	P4	0,11
P1	0,100	P9	0,111			P1	0,100	P5	0,113	P1	0,113	P5	0,103	P12	0,107
		P3	0,109			P3	0,100	P1	0,107					P1	0,104
		P4	0,109												
$\Sigma R_i$	<b>0,547</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,796</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,372</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,682</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,712</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,604</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,580</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,690</b>

Quadro B8 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação quatro para cenários 9 a 16

Cenário 9		Cenário 10		Cenário 11		Cenário 12		Cenário 13		Cenário 14		Cenário 15		Cenário 16	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P8	0,144	P8	0,138	P8	0,170	P8	0,158	P8	0,142	P8	0,139	P8	0,160	P8	0,153
P9	0,114	P12	0,130	P12	0,138	P12	0,143	P9	0,131	P2	0,130	P9	0,117	P2	0,116
P2	0,112	P2	0,122	P9	0,101	P2	0,105	P2	0,130	P9	0,125	P2	0,111	P9	0,116
P4	0,110	P1	0,118			P9	0,105	P4	0,129	P4	0,123	P4	0,110	P12	0,112
P12	0,107	P3	0,116			P1	0,101	P5	0,117	P1	0,119	P5	0,102	P4	0,111
P1	0,104	P9	0,113			P3	0,101	P1	0,112					P1	0,106
		P4	0,111												
$\Sigma R_i$	<b>0,690</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,847</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,410</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,714</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,761</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,636</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,600</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,714</b>

Quadro B9 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação cinco para cenários 1 a 8

Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7		Cenário 8	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P15	0,282	P15	0,272	P15	0,336	P15	0,315	P15	0,328	P15	0,309	P15	0,357	P15	0,336
P8	0,234	P8	0,234	P8	0,241	P8	0,239	P10	0,207						
		P7	0,204												
$\Sigma R_i$	0,516	$\Sigma R_i$	0,710	$\Sigma R_i$	0,576	$\Sigma R_i$	0,554	$\Sigma R_i$	0,536	$\Sigma R_i$	0,309	$\Sigma R_i$	0,357	$\Sigma R_i$	0,336

Quadro B10 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação cinco para cenários 9 a 16

Cenário 9		Cenário 10		Cenário 11		Cenário 12		Cenário 13		Cenário 14		Cenário 15		Cenário 16	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P15	0,336	P15	0,294	P15	0,390	P15	0,344	P15	0,378	P15	0,336	P15	0,400	P15	0,363
		P8	0,215	P8	0,225	P8	0,228	P10	0,292	P10	0,222	P10	0,230		
$\Sigma R_i$	0,336	$\Sigma R_i$	0,510	$\Sigma R_i$	0,616	$\Sigma R_i$	0,572	$\Sigma R_i$	0,670	$\Sigma R_i$	0,559	$\Sigma R_i$	0,630	$\Sigma R_i$	0,363

Quadro B11 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação seis para cenários 1 a 8

Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7		Cenário 8	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P4	0,154	P3	0,135	P4	0,122	P3	0,116	P4	0,148	P3	0,135	P4	0,125	P3	0,120
P3	0,147	P4	0,132	P3	0,117	P4	0,114	P3	0,143	P4	0,133	P3	0,122	P4	0,118
P5	0,145	P2	0,128	P5	0,116	P2	0,110	P5	0,142	P2	0,118	P5	0,121	P2	0,106
P2	0,140	P1	0,118	P2	0,113	P11	0,103	P2	0,123	P5	0,110	P2	0,107	P5	0,099
P1	0,125	P5	0,101	P1	0,102	P1	0,102	P1	0,106	P1	0,105	P1	0,093	P12	0,096
														P1	0,095
														P13	0,095
$\Sigma R_i$	<b>0,712</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,614</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,668</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,545</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,662</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,601</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,568</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,729</b>

Quadro B12 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação seis para cenários 9 a 16

Cenário 9		Cenário 10		Cenário 11		Cenário 12		Cenário 13		Cenário 14		Cenário 15		Cenário 16	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P3	0,120	P3	0,115	P11	0,135	P11	0,130	P3	0,127	P3	0,122	P12	0,118	P12	0,118
P4	0,118	P12	0,108	P12	0,112	P12	0,115	P4	0,127	P12	0,115	P13	0,117	P13	0,118
P2	0,106	P13	0,107	P13	0,112	P13	0,114	P5	0,117	P13	0,114	P3	0,104	P3	0,106
P5	0,099	P2	0,104	P8	0,111	P8	0,108	P12	0,112	P4	0,114	P4	0,104	P11	0,105
P12	0,096	P11	0,104			P3	0,096	P13	0,111	P2	0,099	P11	0,100	P4	0,100
P1	0,095	P4	0,103					P2	0,097			P5	0,098		
P13	0,095	P1	0,099												
$\Sigma R_i$	<b>0,729</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,740</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,471</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,564</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,692</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,563</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,640</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,546</b>



Quadro B13 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação sete para cenários 1 a 8

Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7		Cenário 8	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P12	0,132	P12	0,139	P12	0,145	P12	0,147	P3	0,142	P3	0,142	P12	0,142	P12	0,144
P3	0,129	P3	0,133	P8	0,136	P8	0,135	P4	0,139	P12	0,138	P3	0,125	P3	0,128
P4	0,126	P4	0,121	P3	0,110	P3	0,118	P12	0,133	P4	0,133	P4	0,123	P4	0,121
P5	0,114	P8	0,114	P6	0,110	P4	0,109	P5	0,131	P5	0,103	P5	0,117	P8	0,111
P6	0,112			P4	0,108			P6	0,113			P6	0,111		
P8	0,105			P5	0,100							P8	0,106		
<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,718</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,508</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,709</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,509</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,659</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,515</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,724</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,504</b>

Quadro B14 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação sete para cenários 9 a 16

Cenário 9		Cenário 10		Cenário 11		Cenário 12		Cenário 13		Cenário 14		Cenário 15		Cenário 16	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P12	0,144	P12	0,148	P12	0,157	P12	0,155	P3	0,147	P3	0,146	P12	0,150	P12	0,150
P3	0,128	P3	0,135	P8	0,154	P8	0,147	P4	0,144	P12	0,144	P3	0,122	P3	0,127
P4	0,121	P8	0,122	P3	0,100	P3	0,114	P12	0,140	P4	0,133	P4	0,120	P4	0,118
P8	0,111	P4	0,116	P6	0,100	P4	0,102	P5	0,132			P5	0,112	P8	0,114
		P2	0,109					P6	0,104			P8	0,108		
		P1	0,107									P6	0,105		
<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,504</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,738</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,512</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,518</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,667</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,423</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,718</b>	<b><math>\Sigma R_i</math></b>	<b>0,510</b>

Quadro B15 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação oito para cenários 1 a 8

Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7		Cenário 8	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P4	0,140	P3	0,138	P12	0,124	P12	0,131	P4	0,136	P3	0,135	P12	0,125	P12	0,131
P3	0,136	P4	0,131	P6	0,120	P3	0,121	P3	0,133	P4	0,130	P6	0,122	P3	0,123
P5	0,128	P2	0,127	P4	0,117	P4	0,116	P5	0,128	P2	0,127	P4	0,120	P4	0,119
P6	0,127	P12	0,119	P3	0,115	P8	0,116	P6	0,127	P12	0,121	P3	0,118	P2	0,116
P2	0,125			P8	0,111	P2	0,114	P2	0,125	P6	0,101	P5	0,114	P6	0,102
P12	0,102			P5	0,109			P12	0,111	P5	0,100	P2	0,112		
				P2	0,108										
$\Sigma R_i$	<b>0,757</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,514</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,805</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,599</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,761</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,715</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,712</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,590</b>

Quadro B16 - Resultados da classificação técnica para o componente de aplicação oito para cenários 9 a 16

Cenário 9		Cenário 10		Cenário 11		Cenário 12		Cenário 13		Cenário 14		Cenário 15		Cenário 16	
Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI	Processo	RI
P12	0,131	P12	0,142	P12	0,150	P12	0,151	P12	0,130	P12	0,137	P12	0,143	P12	0,145
P3	0,123	P3	0,132	P8	0,147	P8	0,142	P3	0,126	P3	0,131	P6	0,112	P3	0,116
P4	0,119	P2	0,124	P6	0,105	P3	0,112	P4	0,124	P2	0,124	P3	0,108	P2	0,111
P2	0,116	P4	0,115			P2	0,107	P2	0,121	P4	0,120	P4	0,107	P8	0,111
P6	0,102	P8	0,114			P4	0,101	P6	0,115			P2	0,105	P4	0,108
		P1	0,108					P5	0,112			P8	0,103		
$\Sigma R_i$	<b>0,590</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,736</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,402</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,613</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,726</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,513</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,678</b>	$\Sigma R_i$	<b>0,592</b>

APÊNDICE C – INFORMAÇÕES DOS PROCESSOS DE FUNDIÇÃO DE  
METAIS EMPREGADAS NO APLICATIVO COMPUTACIONAL DO MMSPF NA  
AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO CENÁRIO CINCO

Tabela C1 - Informações dos processos de fundição para avaliação econômica do componente um

Processos de Fundição	Custo do Material (R\$/kg)	Custo Ferramental (R\$) <sup>1</sup>	N	Y <sup>2</sup>	Tamanho Lote	Peso Molde (kg)
<b>P1</b> Areia verde – manual	5,50	1500	2	0,6	320	63 <sup>3</sup>
<b>P2</b> Areia verde – mecanizada	5,50	2000	6	0,6	320	322 <sup>4</sup>
<b>P3</b> Areia verde – automatizada	5,50	2000	6	0,6	320	315 <sup>5</sup>
<b>P4</b> Areia silicato - CO <sub>2</sub>	5,50	1500	2	0,6	320	22,5 <sup>6</sup>
<b>P5</b> Areia com resina – cura frio	5,50	1500	2	0,6	320	22,5 <sup>6</sup>

FONTE: Autor.

LEGENDA: (1) valores obtidos por meio de consulta a ferramentarias e modelações; (2) *Cast Metals Coalisation* (1998); (3) caixa de moldar de dimensões: 300 x 750 x 100 x 100 mm; (4) ABIFA (2009), caixa de moldar de dimensões: 640 x 750 x 240 x 240 mm; (5) HUNTER (2008), moldagem em bolo XL2430, 610 x 762 x 254 x 229; (6) caixa de moldar de dimensões: 300 x 750 x 50 x 50 mm;

Tabela C2 – Exemplo dos cálculos utilizados na avaliação econômica do componente um

Processos de Fundição	Ri <sup>1</sup>	Ri'	Aplicação equação (18)	CP <sub>i</sub> (R\$/kg)	α <sub>i</sub> (R\$/kg)
<b>P1</b> Areia verde – manual	0,110	0,171	$(1,056^2 * 5,5) + (63/2.2.35^3 * 1^4 * 0,08424^5) + (1,203^6 * 0,14392^5 / 0,6) + (3,23^7 * 0,361^5 / 0,6) + (1.1500/320.2.35)$	11,16	65,16
<b>P2</b> Areia verde – mecanizada	0,144	0,224	$(1,056^2 * 5,5) + (322/6.2.35^3 * 1^4 * 0,08424^5) + (1,203^6 * 0,14392^5 / 0,6) + (1,52^7 * 0,361^5 / 0,6) + (1.2000/320.2.35)$	11,59	51,70
<b>P3</b> Areia verde – automatizada	0,103	0,160	$(1,045^2 * 5,5) + (315/6.2.35^3 * 1^4 * 0,08424^5) + (1,191^6 * 0,14392^5 / 0,6) + (1,01^7 * 0,361^5 / 0,6) + (1.2000/320.2.35)$	11,18	70,03
<b>P4</b> Areia silicato - CO <sub>2</sub>	0,146	0,227	$(1,056^2 * 5,5) + (22,5/2.2.35^3 * 4,06^4 * 0,08424^5) + (1,203^6 * 0,14392^5 / 0,6) + (1,72^7 * 0,361^5 / 0,6) + (1.1500/320.2.35)$	10,76	47,37
<b>P5</b> Areia com resina – cura frio	0,140	0,218	$(1,056^2 * 5,5) + (22,5/2.2.35^3 * 2,29^4 * 0,08424^5) + (1,203^6 * 0,14392^5 / 0,6) + (1,72^7 * 0,361^5 / 0,6) + (1.1500/320.2.35)$	10,05	46,18
<b>ΣR<sub>i</sub></b>	<b>0,643</b>	<b>1,000</b>			

FONTE: Autor.

LEGENDA: <sup>1</sup>Dados do apêndice B. <sup>2</sup>Dados da Tabela 16. <sup>3</sup>Cálculo de R = eso molde/peso peça\*N. <sup>4</sup>Tabela 17. <sup>5</sup>Figura 25. <sup>6</sup>Tabela 19. <sup>7</sup>Tabela 20.

Tabela C3 - Informações dos processos de fundição para avaliação econômica do componente dois

Processos de Fundição		Custo do Material (R\$/kg)	Custo Ferramental (R\$) <sup>1</sup>	N	Y <sup>2</sup>	Tamanho Lote	Peso Molde (kg)
<b>P1</b>	Areia verde – manual	14,5	2000	1	0,5	600	50 <sup>3</sup>
<b>P2</b>	Areia verde – mecanizada	14,5	4000	1	0,5	600	55 <sup>4</sup>
<b>P3</b>	Areia verde – automatizada	14,5	4000	1	0,5	600	68 <sup>5</sup>
<b>P4</b>	Areia silicato - CO <sub>2</sub>	14,5	2000	1	0,5	600	18 <sup>6</sup>
<b>P5</b>	Areia com resina – cura frio	14,5	2000	1	0,5	600	18 <sup>6</sup>
<b>P6</b>	Areia com resina – <i>shell molding</i>	14,5	3000	1	0,5	600	1,6 <sup>7</sup>
<b>P8</b>	Processo molde cerâmico	14,5	1600	1	0,5	600	25 <sup>8</sup>
<b>P9</b>	<i>Investment casting</i>	14,5	1600	1	0,5	600	1,3 <sup>9</sup>
<b>P11</b>	Fundição centrífuga - molde metálico	14,5	10000	1	0,5	600	0,0

FONTE: Autor.

LEGENDA: (1) valores obtidos por meio de consulta a ferramentarias e modelações; (2) *Cast Metals Coalisation* (1998); (3) caixa de moldar de dimensões: 16” x 18” x 4” x 4” pol.; (4) ABIFA (2009), caixa de moldar de dimensões: 380 x 520 x 100 x 100 mm; (5) HUNTER (2008), moldagem em bolo XL1419, 483 x 355 x 140 x 115; (6) caixa de moldar de dimensões: 16” x 18” x 1 3/4” x 1 3/4” pol.; (7) casca com 14” x 14” por 1/4” pol. de espessura; (8) molde com 14” x 14” x 2” x 2” pol.; (9) casca com 5 mm de espessura.

Tabela C4 - Informações dos processos de fundição para avaliação econômica do componente três

Processos de Fundição		Custo do Material (R\$/kg)	Custo Ferramental (R\$) <sup>1</sup>	N	Y <sup>2</sup>	Tamanho Lote	Peso Molde (kg)
<b>P2</b>	Areia verde – mecanizada	3	3500	1	0,45	750	55 <sup>3</sup>
<b>P4</b>	Areia silicato - CO <sub>2</sub>	3	1500	1	0,45	750	18 <sup>4</sup>
<b>P5</b>	Areia com resina – cura frio	3	1500	1	0,45	750	18 <sup>4</sup>

FONTE: Autor.

LEGENDA: (1) valores obtidos por meio de consulta a ferramentarias e modelações; (2) *Cast Metals Coalisation* (1998); (3) caixa de moldar de dimensões: 380 x 520 x 100 x 100 mm; (4) caixa de moldar de dimensões: 16” x 18” x 1 3/4” x 1 3/4” pol.

Tabela C5 - Informações dos processos de fundição para avaliação econômica do componente quatro

Processos de Fundição		Custo do Material (R\$/kg)	Custo Ferramental (R\$) <sup>1</sup>	N	Y <sup>2</sup>	Tamanho Lote	Peso Molde (kg)
<b>P1</b>	Areia verde – manual	1,2	9000	1	0,65	400	85 <sup>3</sup>
<b>P2</b>	Areia verde – mecanizada	1,2	12000	1	0,65	400	100 <sup>4</sup>
<b>P4</b>	Areia silicato - CO <sub>2</sub>	1,2	9000	1	0,65	400	68 <sup>5</sup>
<b>P5</b>	Areia com resina – cura frio	1,2	9000	1	0,65	400	68 <sup>5</sup>
<b>P8</b>	Processo molde cerâmico	1,2	9000	1	0,65	400	68 <sup>6</sup>
<b>P9</b>	<i>Investment casting</i>	1,2	7500	1	0,65	400	3 <sup>7</sup>

FONTE: Autor.

LEGENDA: (1) valores obtidos por meio de consulta a ferramentarias e modelações; (2) *Cast Metals Coalisation* (1998); (3) caixa de moldar de dimensões: 16” x 18” x 8” x 6” pol.; (4) ABIFA (2009), caixa de moldar de dimensões: 380 x 520 x 200 x 200 mm; (5) caixa de moldar de dimensões: 16” x 18” x 6” x 5” pol.; (6) molde com 12” x 12” x 6” x 5” pol.; (7) casca com 7 mm de espessura.

Tabela C6 - Informações dos processos de fundição para avaliação econômica do componente cinco

Processos de Fundição		Custo do Material (R\$/kg)	Custo Ferramental (R\$) <sup>1,2</sup>	N	Y <sup>3</sup>	Tamanho Lote	Peso Molde (kg)
<b>P10</b>	Molde cheio - <i>lost foam</i>	5,7	3500	8	0,75	15000	50 <sup>4</sup>
<b>P15</b>	<i>Squeeze casting</i>	5,7	1500	1	0,75	15000	0

FONTE: Autor.

LEGENDA: (1) LOST FOAM (2010); (2) Schwan *et al.* (2002); (3) *Cast Metals Coalisation* (1998); (4) caixa de moldar de dimensões: 400 x 400 x 200 com areia compactada a 1,55 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela C7 - Informações dos processos de fundição para avaliação econômica do componente seis

Processos de Fundição		Custo do Material (R\$/kg)	Custo Ferramental (R\$) <sup>1</sup>	N	Y <sup>2</sup>	Tamanho Lote	Peso Molde (kg)
<b>P1</b>	Areia verde – manual	5,50	12000	2	0,6	50000	115 <sup>3</sup>
<b>P2</b>	Areia verde – mecanizada	5,50	24000	4	0,6	50000	230 <sup>4</sup>
<b>P3</b>	Areia verde – automatizada	5,50	24000	4	0,6	50000	370 <sup>5</sup>
<b>P4</b>	Areia silicato - CO <sub>2</sub>	5,50	12000	2	0,6	50000	75 <sup>6</sup>
<b>P5</b>	Areia com resina – cura frio	5,50	12000	2	0,6	50000	75 <sup>6</sup>

FONTE: Autor.

LEGENDA: (1) valores obtidos por meio de consulta a ferramentarias e modelações; (2) *Cast Metals Coalisation* (1998); (3) caixa de moldar de dimensões: 300 x 900 x 150 x 150 mm; (4) ABIFA (2009), caixa de moldar de dimensões: 700 x 900 x 150 x 150 mm; (5) DISA (2007), moldagem em bolo vertical, série 270A, 750 x 900 x 200 x 200; (6) caixa de moldar de dimensões: 300 x 900 x 100 x 100 mm;

Tabela C8 - Informações dos processos de fundição para avaliação econômica do componente sete

Processos de Fundição		Custo do Material (R\$/kg)	Custo Ferramental (R\$) <sup>1</sup>	N	Y <sup>2</sup>	Tamanho Lote	Peso Molde (kg)
<b>P3</b>	Areia verde – automatizada	1,2	8000	12	0,65	80000	68 <sup>3</sup>
<b>P4</b>	Areia silicato - CO <sub>2</sub>	1,2	6000	12	0,65	80000	18 <sup>4</sup>
<b>P5</b>	Areia com resina – cura frio	1,2	6000	12	0,65	80000	18 <sup>4</sup>
<b>P6</b>	Areia com resina – <i>shell molding</i>	1,2	12000	12	0,65	80000	3,2 <sup>5</sup>
<b>P12</b>	Molde permanente - gravidade	1,2	32000	6	0,65	80000	0,0

FONTE: Autor.

LEGENDA: (1) valores obtidos por meio de consulta a ferramentarias e modelações; (2) *Cast Metals Coalisation* (1998); (3) HUNTER (2008), moldagem em bolo XL1419, 483 x 355 x 140 x 115; (4) caixa de moldar de dimensões: 12” x 24” x 2” x 1” pol.; (5) casca com 12” x 24” por ¼” pol. de espessura.

Tabela C9 - Informações dos processos de fundição para avaliação econômica do componente oito

Processos de Fundição		Custo do Material (R\$/kg)	Custo Ferramental (R\$) <sup>1</sup>	N	Y <sup>2</sup>	Tamanho Lote	Peso Molde (kg)
<b>P2</b>	Areia verde – mecanizada	1,2	15000	1	0,65	12000	100 <sup>3</sup>
<b>P3</b>	Areia verde – automatizada	1,2	15000	1	0,65	12000	68 <sup>4</sup>
<b>P4</b>	Areia silicato - CO <sub>2</sub>	1,2	10000	1	0,65	12000	50 <sup>5</sup>
<b>P5</b>	Areia com resina – cura frio	1,2	10000	1	0,65	12000	50 <sup>5</sup>
<b>P6</b>	Areia com resina – <i>shell molding</i>	1,2	22500	1	0,65	12000	3,5 <sup>6</sup>
<b>P12</b>	Molde permanente - gravidade	1,2	60000	1	0,65	12000	0,0

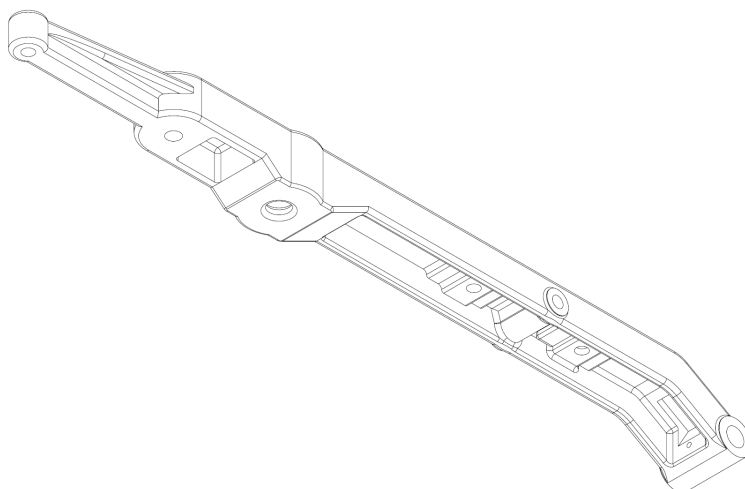
FONTE: Autor.

LEGENDA: (1) valores obtidos por meio de consulta a ferramentarias e modelações; (2) *Cast Metals Coalisation* (1998); (3) ABIFA (2009), caixa de moldar de dimensões: 380 x 520 x 200 x 200 mm; (4) HUNTER (2008), moldagem em bolo XL1419, 483 x 355 x 140 x 115; (5) caixa de moldar de dimensões: 14” x 16” x 6” x 4” pol.; (6) casca com 14” x 16” por 5/16” pol. de espessura.

APÊNDICE D – INSTRUMENTO DE VALIDAÇÃO DO MMSPF



### Caso de Estudo 1



Ordem	Informações do Componente	Valores das Informações
D1	Material	Alumínio
D2	Peso (kg)	2,35
D3	Tamanho de lote anual (peças)	320
D4	Maior dimensão (mm)	672
D5	Maior espessura de seção (mm)	20
D6	Menor espessura de seção (mm)	8
D7	Rugosidade Superficial Máxima ( $\mu\text{m}$ ) Ra	Não informada.
D8	Ângulo de extração mínimo ( graus)	1,5
D9	Tolerância Dimensional	$\pm 1,5$ (comprimento)

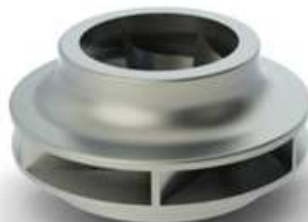
**Etapa 1: Com base no componente fundido apresentado acima e considerando as informações apresentadas: Exclua os processos de fundição de metais, apresentados na tabela abaixo, que na sua opinião, não são adequados para produzir o componente com as características apresentadas.**

**Etapa 2: Dos processos de fundição de metais não eliminados, qual ou quais na sua opinião podem produzir o componente apresentado atendendo adequadamente todas as informações técnicas apresentadas?**

**Etapa 3: Dos processos de fundição de metais julgados como adequados em termos técnicos para produzir o componente apresentado, qual você escolheria como mais adequado do ponto de vista econômico?**

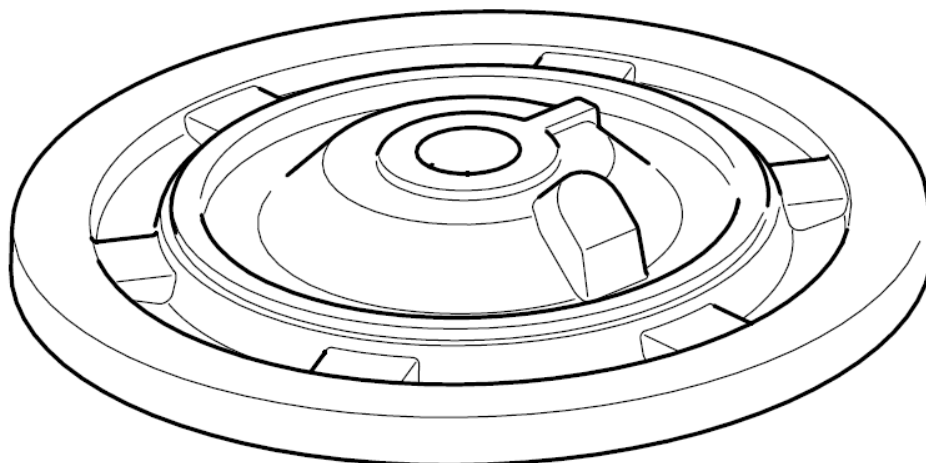
Processos de Fundição		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
P1	Areia Verde – Manual			
P2	Areia Verde – Mecanizada			
P3	Areia Verde – Automatizada			
P4	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>			
P5	Areia com Resina – Cura frio			
P6	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>			
P7	Processo Molde de Gesso			
P8	Processo Molde Cerâmico			
P9	<i>Investment Casting</i>			
P10	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>			
P11	Fundição Centrífuga - Molde Metálico			
P12	Molde Permanente - Gravidade			
P13	Molde Permanente - Baixa Pressão			
P14	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>			
P15	<i>Squeeze Casting</i>			

### Caso de Estudo 2



Ordem	Informações do Componente	Valores das Informações		
D1	Material	Liga de cobre para fundição		
D2	Peso (kg)	6,7		
D3	Tamanho de lote anual (peças)	600		
D4	Maior dimensão (mm)	230		
D5	Maior espessura de seção (mm)	17		
D6	Menor espessura de seção (mm)	6		
D7	Rugosidade Superficial Máxima ( $\mu\text{m}$ ) Ra	3,2		
D8	Ângulo de extração mínimo ( graus)	1,5		
D9	Tolerância Dimensional	$\pm 1,2$		
<b>Etapa 1: Com base no componente fundido apresentado acima e considerando as informações apresentadas: Exclua os processos de fundição de metais, apresentados na tabela abaixo, que na sua opinião, não são adequados para produzir o componente com as características apresentadas.</b>				
<b>Etapa 2: Dos processos de fundição de metais não eliminados, qual ou quais na sua opinião podem produzir o componente apresentado atendendo adequadamente todas as informações técnicas apresentadas?</b>				
<b>Etapa 3: Dos processos de fundição de metais julgados como adequados em termos técnicos para produzir o componente apresentado, qual você escolheria como mais adequado do ponto de vista econômico?</b>				
Processos de Fundição		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
P1	Areia Verde – Manual			
P2	Areia Verde – Mecanizada			
P3	Areia Verde – Automatizada			
P4	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>			
P5	Areia com Resina – Cura frio			
P6	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>			
P7	Processo Molde de Gesso			
P8	Processo Molde Cerâmico			
P9	<i>Investment Casting</i>			
P10	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>			
P11	Fundição Centrífuga - Molde Metálico			
P12	Molde Permanente - Gravidade			
P13	Molde Permanente - Baixa Pressão			
P14	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>			
P15	<i>Squeeze Casting</i>			

### Caso de Estudo 3



Ordem	Informações do Componente	Valores das Informações
D1	Material	Aço baixo carbono
D2	Peso (kg)	10,7
D3	Tamanho de lote anual (peças)	750
D4	Maior dimensão (mm)	284
D5	Maior espessura de seção (mm)	27
D6	Menor espessura de seção (mm)	6,5
D7	Rugosidade Superficial Máxima ( $\mu\text{m}$ ) Ra	Não informada.
D8	Ângulo de extração mínimo ( graus)	1,5°
D9	Tolerância Dimensional	$\pm 1,5$

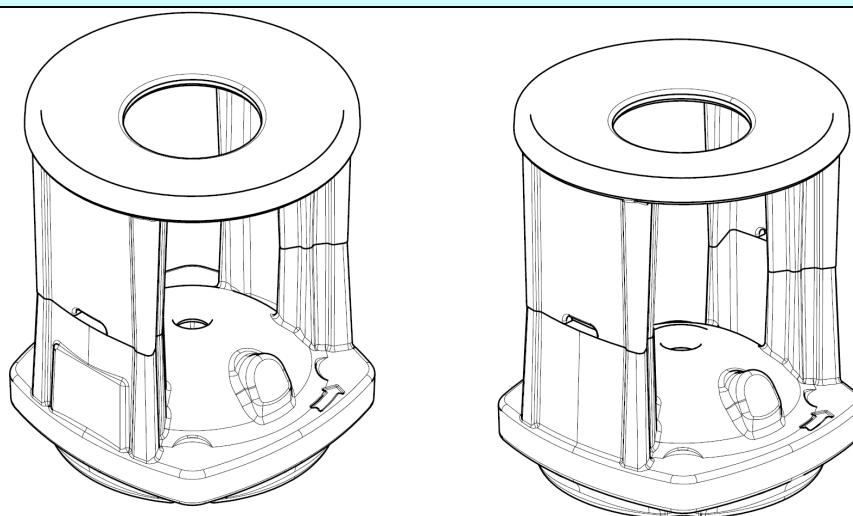
**Etapa 1: Com base no componente fundido apresentado acima e considerando as informações apresentadas: Exclua os processos de fundição de metais, apresentados na tabela abaixo, que na sua opinião, não são adequados para produzir o componente com as características apresentadas.**

**Etapa 2: Dos processos de fundição de metais não eliminados, qual ou quais na sua opinião podem produzir o componente apresentado atendendo adequadamente todas as informações técnicas apresentadas?**

**Etapa 3: Dos processos de fundição de metais julgados como adequados em termos técnicos para produzir o componente apresentado, qual você escolheria como mais adequado do ponto de vista econômico?**

Processos de Fundição		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
P1	Areia Verde – Manual			
P2	Areia Verde – Mecanizada			
P3	Areia Verde – Automatizada			
P4	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>			
P5	Areia com Resina – Cura frio			
P6	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>			
P7	Processo Molde de Gesso			
P8	Processo Molde Cerâmico			
P9	<i>Investment Casting</i>			
P10	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>			
P11	Fundição Centrífuga - Molde Metálico			
P12	Molde Permanente - Gravidade			
P13	Molde Permanente - Baixa Pressão			
P14	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>			
P15	<i>Squeeze Casting</i>			

### Caso de Estudo 4



Ordem	Informações do Componente	Valores das Informações
D1	Material	Ferro Fundido Cinzento
D2	Peso (kg)	16,3
D3	Tamanho de lote anual (peças)	400
D4	Maior dimensão (mm)	262,5
D5	Maior espessura de seção (mm)	16
D6	Menor espessura de seção (mm)	5,5
D7	Rugosidade Superficial Máxima ( $\mu\text{m}$ ) Ra	Não informada.
D8	Ângulo de extração mínimo ( graus)	Não informado.
D9	Tolerância Dimensional	Não informada.

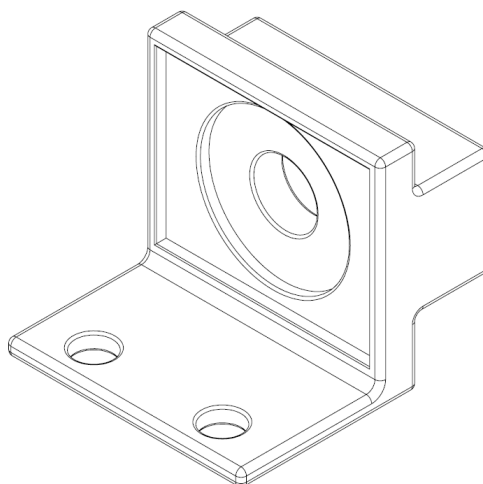
**Etapa 1: Com base no componente fundido apresentado acima e considerando as informações apresentadas: Exclua os processos de fundição de metais, apresentados na tabela abaixo, que na sua opinião, não são adequados para produzir o componente com as características apresentadas.**

**Etapa 2: Dos processos de fundição de metais não eliminados, qual ou quais na sua opinião podem produzir o componente apresentado atendendo adequadamente todas as informações técnicas apresentadas?**

**Etapa 3: Dos processos de fundição de metais julgados como adequados em termos técnicos para produzir o componente apresentado, qual você escolheria como mais adequado do ponto de vista econômico?**

Processos de Fundição		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
P1	Areia Verde – Manual			
P2	Areia Verde – Mecanizada			
P3	Areia Verde – Automatizada			
P4	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>			
P5	Areia com Resina – Cura frio			
P6	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>			
P7	Processo Molde de Gesso			
P8	Processo Molde Cerâmico			
P9	<i>Investment Casting</i>			
P10	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>			
P11	Fundição Centrífuga - Molde Metálico			
P12	Molde Permanente - Gravidade			
P13	Molde Permanente - Baixa Pressão			
P14	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>			
P15	<i>Squeeze Casting</i>			

### Caso de Estudo 5



Ordem	Informações do Componente	Valores das Informações
D1	Material	Zinco
D2	Peso (kg)	2,45
D3	Tamanho de lote anual (peças)	15.000
D4	Maior dimensão (mm)	80
D5	Maior espessura de seção (mm)	22
D6	Menor espessura de seção (mm)	7,5
D7	Rugosidade Superficial Máxima ( $\mu\text{m}$ ) Ra	1,6
D8	Ângulo de extração mínimo ( graus)	0,5
D9	Tolerância Dimensional	$\pm 0,5$

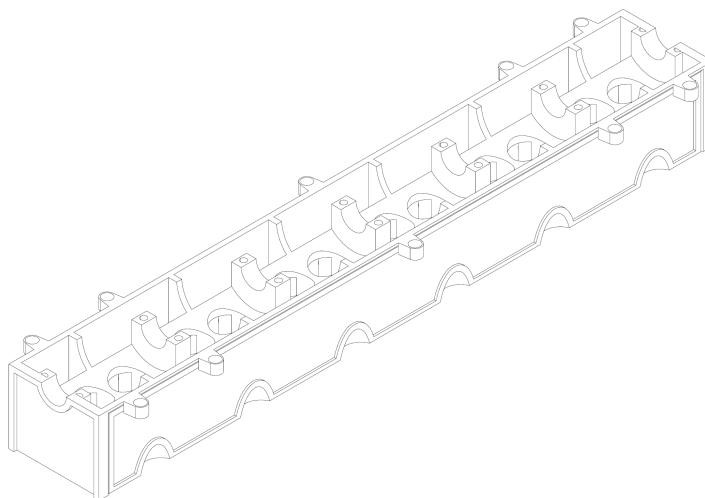
**Etapa 1: Com base no componente fundido apresentado acima e considerando as informações apresentadas: Exclua os processos de fundição de metais, apresentados na tabela abaixo, que na sua opinião, não são adequados para produzir o componente com as características apresentadas.**

**Etapa 2: Dos processos de fundição de metais não eliminados, qual ou quais na sua opinião podem produzir o componente apresentado atendendo adequadamente todas as informações técnicas apresentadas?**

**Etapa 3: Dos processos de fundição de metais julgados como adequados em termos técnicos para produzir o componente apresentado, qual você escolheria como mais adequado do ponto de vista econômico?**

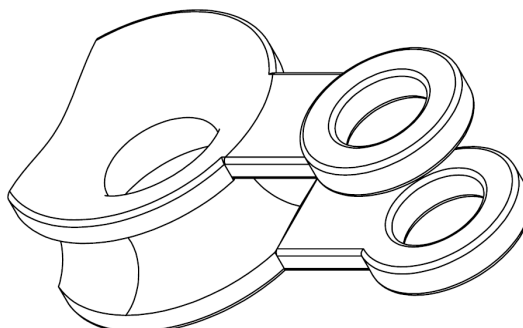
Processos de Fundição		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
P1	Areia Verde – Manual			
P2	Areia Verde – Mecanizada			
P3	Areia Verde – Automatizada			
P4	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>			
P5	Areia com Resina – Cura frio			
P6	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>			
P7	Processo Molde de Gesso			
P8	Processo Molde Cerâmico			
P9	<i>Investment Casting</i>			
P10	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>			
P11	Fundição Centrífuga - Molde Metálico			
P12	Molde Permanente - Gravidade			
P13	Molde Permanente - Baixa Pressão			
P14	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>			
P15	<i>Squeeze Casting</i>			

### Caso de Estudo 6



Ordem	Informações do Componente	Valores das Informações		
D1	Material	Liga Alumínio (7% Silício)		
D2	Peso (kg)	3,5		
D3	Tamanho de lote anual (peças)	50.000		
D4	Maior dimensão (mm)	800		
D5	Maior espessura de seção (mm)	24		
D6	Menor espessura de seção (mm)	4		
D7	Rugosidade Superficial Máxima ( $\mu\text{m}$ ) Ra	6		
D8	Ângulo de extração mínimo ( graus)	Não informado.		
D9	Tolerância Dimensional	$\pm 2,0$ (800 mm)		
<b>Etapa 1: Com base no componente fundido apresentado acima e considerando as informações apresentadas: Exclua os processos de fundição de metais, apresentados na tabela abaixo, que na sua opinião, não são adequados para produzir o componente com as características apresentadas.</b>				
<b>Etapa 2: Dos processos de fundição de metais não eliminados, qual ou quais na sua opinião podem produzir o componente apresentado atendendo adequadamente todas as informações técnicas apresentadas?</b>				
<b>Etapa 3: Dos processos de fundição de metais julgados como adequados em termos técnicos para produzir o componente apresentado, qual você escolheria como mais adequado do ponto de vista econômico?</b>				
Processos de Fundição		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
<b>P1</b>	Areia Verde – Manual			
<b>P2</b>	Areia Verde – Mecanizada			
<b>P3</b>	Areia Verde – Automatizada			
<b>P4</b>	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>			
<b>P5</b>	Areia com Resina – Cura frio			
<b>P6</b>	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>			
<b>P7</b>	Processo Molde de Gesso			
<b>P8</b>	Processo Molde Cerâmico			
<b>P9</b>	<i>Investment Casting</i>			
<b>P10</b>	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>			
<b>P11</b>	Fundição Centrífuga - Molde Metálico			
<b>P12</b>	Molde Permanente - Gravidade			
<b>P13</b>	Molde Permanente - Baixa Pressão			
<b>P14</b>	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>			
<b>P15</b>	<i>Squeeze Casting</i>			

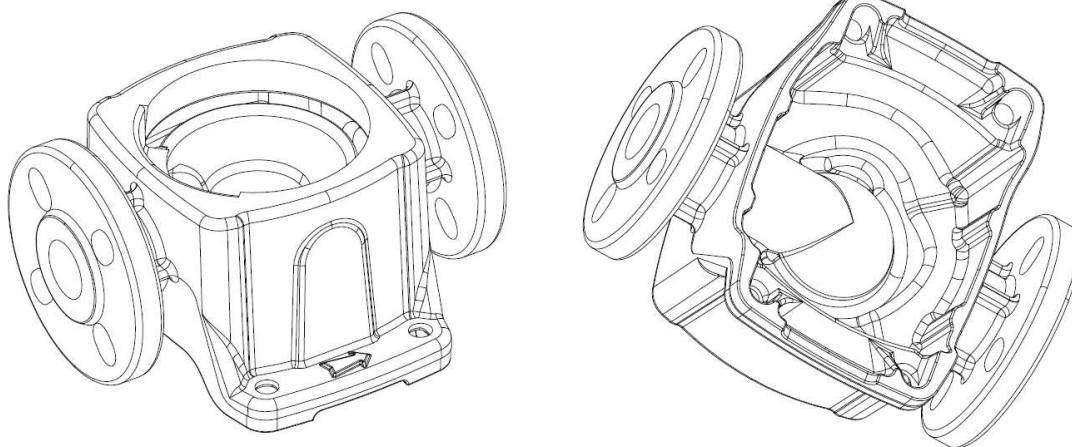
### Caso de Estudo 7



Ordem	Informações do Componente	Valores das Informações		
D1	Material	Ferro Fundido Nodular		
D2	Peso (kg)	0,400		
D3	Tamanho de lote anual (peças)	80.000		
D4	Maior dimensão (mm)	105		
D5	Maior espessura de seção (mm)	10		
D6	Menor espessura de seção (mm)	5		
D7	Rugosidade Superficial Máxima ( $\mu\text{m}$ ) Ra	Não informada.		
D8	Ângulo de extração mínimo ( graus)	Não informado		
D9	Tolerância Dimensional	$\pm 0,8$		
<p><b>Etapa 1: Com base no componente fundido apresentado acima e considerando as informações apresentadas: Exclua os processos de fundição de metais, apresentados na tabela abaixo, que na sua opinião, não são adequados para produzir o componente com as características apresentadas.</b></p>				
<p><b>Etapa 2: Dos processos de fundição de metais não eliminados, qual ou quais na sua opinião podem produzir o componente apresentado atendendo adequadamente todas as informações técnicas apresentadas?</b></p>				
<p><b>Etapa 3: Dos processos de fundição de metais julgados como adequados em termos técnicos para produzir o componente apresentado, qual você escolheria como mais adequado do ponto de vista econômico?</b></p>				
Processos de Fundição		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
P1	Areia Verde – Manual			
P2	Areia Verde – Mecanizada			
P3	Areia Verde – Automatizada			
P4	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>			
P5	Areia com Resina – Cura frio			
P6	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>			
P7	Processo Molde de Gesso			
P8	Processo Molde Cerâmico			
P9	<i>Investment Casting</i>			
P10	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>			
P11	Fundição Centrífuga - Molde Metálico			
P12	Molde Permanente - Gravidade			
P13	Molde Permanente - Baixa Pressão			
P14	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>			
P15	<i>Squeeze Casting</i>			



### Caso de Estudo 8



Ordem	Informações do Componente	Valores das Informações		
D1	Material	Ferro Fundido Cinzento		
D2	Peso (kg)	11,2		
D3	Tamanho de lote anual (peças)	12.000		
D4	Maior dimensão (mm)	220		
D5	Maior espessura de seção (mm)	22		
D6	Menor espessura de seção (mm)	7,7		
D7	Rugosidade Superficial Máxima ( $\mu\text{m}$ ) Ra	Não informada.		
D8	Ângulo de extração mínimo ( graus)	1°		
D9	Tolerância Dimensional	$\pm 1,2$		
<b>Etapa 1: Com base no componente fundido apresentado acima e considerando as informações apresentadas: Exclua os processos de fundição de metais, apresentados na tabela abaixo, que na sua opinião, não são adequados para produzir o componente com as características apresentadas.</b>				
<b>Etapa 2: Dos processos de fundição de metais não eliminados, qual ou quais na sua opinião podem produzir o componente apresentado atendendo adequadamente todas as informações técnicas apresentadas?</b>				
<b>Etapa 3: Dos processos de fundição de metais julgados como adequados em termos técnicos para produzir o componente apresentado, qual você escolheria como mais adequado do ponto de vista econômico?</b>				
Processos de Fundição		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
P1	Areia Verde – Manual			
P2	Areia Verde – Mecanizada			
P3	Areia Verde – Automatizada			
P4	Areia Silicato - CO <sub>2</sub>			
P5	Areia com Resina – Cura frio			
P6	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>			
P7	Processo Molde de Gesso			
P8	Processo Molde Cerâmico			
P9	<i>Investment Casting</i>			
P10	Molde Cheio - <i>Lost Foam</i>			
P11	Fundição Centrífuga - Molde Metálico			
P12	Molde Permanente - Gravidade			
P13	Molde Permanente - Baixa Pressão			
P14	<i>Fundição sob Pressão - Die Casting</i>			
P15	<i>Squeeze Casting</i>			