

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Rodrigo Lemos Pereira**

**USO DE MÉTODO DE DECISÃO  
MULTI-CRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE UM  
FORNECEDOR DE MOLDES PARA FUNDIÇÃO  
DE AUTOPEÇAS**

**Taubaté – SP**  
**2011**

**Rodrigo Lemos Pereira**

**USO DE MÉTODO DE DECISÃO  
MULTI-CRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE UM  
FORNECEDOR DE MOLDES PARA FUNDIÇÃO  
DE AUTOPEÇAS**

Dissertação apresentada para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Mecânica  
pela Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Produção Mecânica  
Orientador: Prof. Dr. Fernando A. E. Claro

**Taubaté – SP  
2011**

Pereira, Rodrigo Lemos.

P436u

Uso de método de decisão multi-critério para seleção de um fornecedor de moldes para fundição de autopeças./ Rodrigo Lemos Pereira. – Taubaté: Unitau, 2011.

58f. : il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. Curso de Engenharia Mecânica.

Orientador: Fernando Antonio Elias Claro

1. Seleção de fornecedor. 2. Processo Hierárquico Analítico. 3. Qualidade.

I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD(21) 658

**Rodrigo Lemos Pereira**

**USO DE MÉTODO DE DECISÃO MULTI-CRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE UM FORNECEDOR DE MOLDES PARA FUNDIÇÃO DE AUTOPEÇAS**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté.  
Área de Concentração: Produção Mecânica

Data: \_\_\_\_\_

Resultado: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Marcela Aparecida Guerreiro Machado      Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – FEG/UNESP

Assinatura:

Prof. Dr. Gilberto Walter Arenas Miranda      Universidade de Taubaté

Assinatura:

Prof. Dr. Fernando Antonio Elias Claro      Universidade de Taubaté

Assinatura:

A todos da minha família, MUITO OBRIGADO por existirem e fazerem parte da minha vida. Amo muito vocês.

Aos meus pais Carlos Alberto e Margarida e irmão Renato,  
A minha esposa Marcela e às minhas filhas Maria Olívia e Manuela.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Fernando A. E. Claro pelo excepcional trabalho de orientação.

À MAN Latin America pelo apoio financeiro.

À UNITAU pela estrutura oferecida.

Aos Profs.Drs. Marcela Aparecida Guerreiro Machado e Gilberto Walter Arenas Miranda, pelas contribuições e sugestões de melhoria oferecidas à este trabalho.

## RESUMO

A complexidade no processo de produção de veículos deve-se, entre outras razões, aos inúmeros componentes utilizados na montagem, que em geral tem elevado conteúdo tecnológico. Os fundidos enquadram-se perfeitamente nesta categoria e somente podem ser produzidos com qualidade e custo competitivo com o emprego de moldes apropriados. A fabricação destes moldes é feita usando-se modernas tecnologias computacionais e materiais de alto desempenho e confiabilidade. Embora destinados à produção em massa, cada molde é um produto único cuja manufatura requer conhecimento técnico específico e familiaridade com o processo de fundição onde serão utilizados. A escolha de um fornecedor para moldes de fundição é normalmente um problema complicado e que consome tempo. A análise envolve múltiplos critérios, que podem ser conflitantes ou superpostos, objetivos ou subjetivos. O objetivo deste trabalho é mostrar a utilização do processo hierárquico analítico (AHP) para selecionar um fornecedor de um molde para uso no processo de fundição sob pressão, para produção de uma carcaça de transmissão. Através da revisão de literatura técnica e contatos com especialistas, diversos critérios qualitativos e quantitativos foram identificados para a escolha do fornecedor. Posteriormente estes critérios foram hierarquizados em tres níveis e as prioridades entre eles identificadas em matrizes de comparação. A seguir, calculou-se a razão de consistência para cada uma das matrizes e obteve-se o escore final de cada fornecedor em potencial. O estudo foi concluído com uma análise de sensibilidade, que contribuiu para ratificar a escolha do fornecedor selecionado. A aplicação do método melhorou o processo de seleção pela redução da subjetividade e pela ponderação dos critérios julgados importantes em um fabricante de moldes complexos.

**Palavras-chave:** Molde, Fundição Sob Pressão, Método de Decisão Multicritério, Processo Hierárquico Analítico, Seleção de fornecedor.

## **ABSTRACT**

The complexity in the vehicles production process is due mainly to the large number of assembled components that are generally characterized by a high technological content. The castings, one of these components, fit perfectly in this category and they only can be made at a competitive quality and cost level if a proper tooling is available. The molds and dies manufacturing process requires modern computer technologies and materials of high reliability and performance. Although made to mass production, toolings are unique products whose manufacturing requires technical knowledge and familiarity with the casting process where they will be employed. The selection of a casting tooling supplier is usually a complicated and time-consuming issue. The decision process is based on several criteria that can be conflicting or superposed, objective or subjective. In the present paper the analytic hierarchy process (AHP) was used to select a tooling supplier for the manufacturing of a transmission housing by the die casting process. Several qualitative and quantitative criteria for the tooling supplier selection were identified through the technical literature review and discussion with foundry specialists. Subsequently, the criteria hierarchy was established in three levels and comparison matrixes were developed to determine the priorities among them. The consistency ratio for each matrix was calculated and the final score of each potential supplier was determined. The study was concluded with a sensitivity analysis that contributed to confirm the choice of the selected supplier. The application of the methodology improved the selection process by reducing the subjectivity and by weighing the major selection criteria.

**Keywords:** Analytic Hierarchy Process. Die Casting Process. Multicriteria Decision Method. Supplier Selection. Tooling.

## LISTA DE TABELAS

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabela 1  | Índice randômico médio do AHP   | 32 |
| Tabela 2  | Cálculo do AHP (Exemplo Hipotético)   | 33 |
| Tabela 3  | Matriz de Comparação para os critérios  | 42 |
| Tabela 4  | Matriz de Comparação para os sub-critérios de projeto                                   | 42 |
| Tabela 5  | Matriz de Comparação para os sub-critérios de qualidade                                 | 42 |
| Tabela 6  | Matriz de Comparação para os sub-critérios de manufatura                                | 43 |
| Tabela 7  | Matriz de Comparação para os sub-critérios de preço                                     | 43 |
| Tabela 8  | Matriz de Comparação para os sub-critérios de prazo                                     | 43 |
| Tabela 9  | Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério complexidade dos moldes              | 43 |
| Tabela 10 | Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério CAD/CAM/CAE                          | 44 |
| Tabela 11 | Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério tratamento térmico                   | 44 |
| Tabela 12 | Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério “Usinagem, Acabamento e Montagem”    | 44 |
| Tabela 13 | Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério “Sistema da Qualidade”               | 44 |
| Tabela 14 | Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério “Qualidade Dimensional”              | 45 |
| Tabela 15 | Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério “ <i>Set-up</i> e Amostras Iniciais” | 45 |
| Tabela 16 | Desempenho normalizado dos fornecedores   | 46 |
| Tabela 17 | Escore final dos fornecedores   | 47 |
| Tabela 18 | Cenários submetidos à Análise de Sensibilidade  | 49 |
| Tabela 19 | Análise Exploratória pró Fornecedores (F1) e (F3)                                       | 50 |
| Tabela A1 | Cenário A (ênfase em manufatura)  | 56 |
| Tabela A2 | Cenário B (ênfase em qualidade)   | 56 |
| Tabela A3 | Cenário C (ênfase em prazo)   | 56 |
| Tabela A4 | Cenário D (ênfase em preço)   | 57 |
| Tabela A5 | Cenário pró Fornecedor (F1)   | 57 |
| Tabela A6 | Cenário pró Fornecedor (F3)   | 57 |

## LISTA DE FIGURAS

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | Evolução da fabricação de veículos na década atual   | 20 |
| Figura 2  | Configuração de cavidades em molde de fundição sob pressão   | 21 |
| Figura 3  | Representação de uma injetora de câmara fria   | 22 |
| Figura 4  | Esquema geral de um sistema integrado CAD/CAE/CAM usado no projeto de molde de fundição sob pressão      | 24 |
| Figura 5  | Modelo sólido de um Corpo de Bomba de Água fundida sob pressão   | 24 |
| Figura 6  | Trecho de simulação de solidificação de uma Carcaça de Transmissão fundida sob pressão                   | 25 |
| Figura 7  | Ilustração do modelo sólido do molde do Corpo de Bomba de Água   | 25 |
| Figura 8  | Ilustração da simulação de um programa de usinagem para um componente do molde do Corpo de Bomba de Água | 26 |
| Figura 9  | Ilustração de um centro de usinagem com eixos horizontais  | 27 |
| Figura 10 | Ilustração dos princípios de um centro de usinagem com cinco eixos                                       | 27 |
| Figura 11 | Ilustração esquemática de uma máquina de medir por coordenadas (CMM)                                     | 28 |
| Figura 12 | Arranjo de grupos e subgrupos  | 30 |
| Figura 13 | Exemplo típico de uma Carcaça de Transmissão fundida sob pressão   | 36 |
| Figura 14 | Fluxograma do método de seleção de fornecedores  | 36 |

## LISTA DE QUADROS

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Quadro 1 | Etapas do projeto e da fabricação do molde                                      | 23 |
| Quadro 2 | Escala de importância relativa  | 31 |
| Quadro 3 | Matriz de comparações entre os critérios  | 31 |
| Quadro 4 | Critérios e sub-critérios subjetivos de avaliação para os fornecedores de molde | 37 |
| Quadro 5 | Sub-critérios subjetivos de avaliação e respectivos atributos                   | 38 |
| Quadro 6 | Critérios e sub-critérios objetivos de avaliação                                | 40 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|                |   |
|----------------|---|
| ABAL           | Associação Brasileira de Alumínio   |
| AFF            | Prazo de aprovação final do molde   |
| AHP            | <i>Analytical Hierarchy Process</i> (Processo Hierárquico Analítico)                              |
| ANFAVEA        | Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores                                       |
| C <sub>1</sub> | Critério 1  |
| C <sub>2</sub> | Critério 2  |
| C <sub>3</sub> | Critério 3  |
| C <sub>n</sub> | Critério n  |
| CAD            | <i>Computer-Aided Design</i> (Projeto apoiado por computador)                                     |
| CAE            | <i>Computer-Aided Engineering</i> (Engenharia apoiada por computador)                             |
| CAM            | <i>Computer-Aided Manufacturing</i> (Manufatura apoiada por computador)                           |
| CFP            | Complexidade dos moldes já projetados   |
| CFP1           | Baixa complexidade dos moldes já projetados   |
| CFP2           | Média complexidade dos moldes já projetados   |
| CFP3           | Alta complexidade dos moldes já projetados  |
| CI             | <i>Random consistency index</i> (Índice de consistência aleatória)                                |
| CMM            | <i>Coordinate-measuring machine</i> (Máquina de medir por coordenadas)                            |
| CNC            | <i>Computer Numerical Control</i> (Controle Numérico por Computador)                              |
| COP            | Prazo de conclusão do projeto   |
| CR             | <i>Consistency Ratio</i> (Razão de consistência)  |
| EAA            | <i>European Aluminum Association</i> (Associação Européia de Alumínio)                            |
| ETF            | Prazo de entrega e teste do molde   |
| F1             | Fornecedor 1  |
| F2             | Fornecedor 2  |
| F3             | Fornecedor 3  |
| MAN            | Manufatura  |
| NADCA          | <i>North America Die Casting Association</i> (Associação Norte-Americana de Fundição sob Pressão) |
| PFE            | Preço do molde  |
| PPJ            | Preço do projeto  |

|      |  |
|------|--|
| PRJ  | Projeto  |
| PRO  | Preço  |
| PRZ  | Prazo  |
| QDI  | Qualidade Dimensional                          |
| QDI1 | Instrumentos Manuais de Medição                |
| QDI2 | Máquina de Medir por Coordenadas               |
| QDI3 | Braço portátil de medição                      |
| QLD  | Qualidade                                      |
| SAI  | Set-up e Amostras Iniciais                     |
| SAI1 | Dimensional do fundido                         |
| SAI2 | Aparência e sanidade do fundido                |
| SAI3 | <i>Set-up</i> do molde                         |
| SCM  | <i>Supply Chain Management</i>                 |
| SOF  | CAD/CAM/CAE                                    |
| SOF1 | CAD (sólido)                                   |
| SOF2 | CAD (superfície)                               |
| SOF3 | CAM (caminho de usinagem)                      |
| SOF4 | Projeto/Medição Integrados                     |
| SOF5 | Simulação de fluxo e solidificação             |
| SQL  | Sistema da Qualidade                           |
| SQL1 | Autocertificado                                |
| SQL2 | Certificado ISO 9000                           |
| SQL3 | Certificado ISO TS 16949 ou similar            |
| TTO  | Tratamento Térmico                             |
| TTO1 | Forno Convencional                             |
| TTO2 | Forno a vácuo, alta velocidade de resfriamento |
| UAM  | Usinagem, Acabamento e Montagem                |
| UAM1 | Fresadoras Verticais com CNC para Desbaste     |
| UAM2 | Centros Usinagem, 3/5 eixos, HS, com CNC       |
| UAM3 | Eletroerosão                                   |
| UAM4 | Prensa de fechamento                           |
| UAM5 | Acabamento superficial                         |

# SUMÁRIO

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>   | 14 |
| 1.1       | CONTEXTUALIZAÇÃO  | 14 |
| 1.2       | OBJETIVO  | 16 |
| 1.3       | DELIMITAÇÃO DO TRABALHO   | 16 |
| 1.4       | ABORDAGEM METODOLÓGICA  | 17 |
| 1.5       | ESTRUTURA DO TRABALHO   | 17 |
| <b>2.</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA</b>                                      | 19 |
| 2.1       | FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO  | 19 |
| 2.2       | MOLDES PARA FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO                                  | 20 |
| 2.3       | PROCESSO HIERÁRQUICO ANALÍTICO                                    | 29 |
| 2.3.1     | CÁLCULOS NO AHP   | 31 |
| 2.4       | MEDIÇÃO DO DESEMPENHO   | 34 |
| 2.5       | SCORE FINAL DO FORNECEDOR   | 35 |
| <b>3.</b> | <b>METODOLOGIA</b>  | 36 |
| <b>4.</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>                                     | 37 |
| 4.1       | IDENTIFICAÇÃO DOS CRITÉRIOS, SUB-CRITÉRIOS E ATRIBUTOS            | 37 |
| 4.2       | PRIORIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS, SUB-CRITÉRIOS E ATRIBUTOS              | 41 |
| 4.3       | ANÁLISE DE SENSIBILIDADE  | 48 |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSÃO</b>  | 51 |
| <b>6.</b> | <b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</b>                            | 52 |
|           | <b>REFERÊNCIAS</b>  | 53 |
|           | <b>APENDICE A - MATRIZES DE COMPARAÇÃO EM DIFERENTES CENÁRIOS</b> | 56 |
|           | <b>AUTORIZAÇÃO PARA REPRODUÇÃO</b>                                | 58 |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Nos últimos anos a indústria automobilística tem vivido uma explosão de desenvolvimento impulsionada, principalmente, pela globalização e pelo crescimento econômico. Neste cenário, para que se mantenham competitivas, as montadoras de veículos são obrigadas a reduzir o prazo de lançamento de novos projetos, aumentar significativamente o conteúdo de novas tecnologias e/ou realizar alterações muitas vezes radicais em seus produtos para atingir as preferências do mercado, que por sua vez torna-se cada vez mais exigente e ávido por novidades (MAGUIRE e HAGEN, 1999).

Como estas empresas têm optado por concentrar seu foco nos segmentos do processo em que são especialistas (*core-business*) elas dependem cada vez mais de seus fornecedores para atingir seus objetivos e, por esta razão, empregam uma proporção significativa da receita na compra de matéria-prima, moldes e equipamentos que buscam em um mercado cada vez mais globalizado (MURALIDHARAN, ANANTHARAMAN e DESHMUKH, 2002).

Os líderes destas empresas devem analisar a melhor estratégia para cada tipo de negócio. Dar foco as competências fundamentais, terceirizar tarefas não específicas e consolidar todas as entradas de fornecedores são etapas chaves para melhorar progressivamente o gerenciamento da cadeia de suprimentos ou *Supply Chain Management* (SCM) (COX *et al.*, 2003).

A evolução na tecnologia de sistemas de comunicação e informação, o crescimento do ambiente de competição global e a redução de regulamentações governamentais têm levado as empresas a aumentar o foco no gerenciamento da cadeia de suprimentos (TRACEY e TAN, 2001).

O termo gerenciamento da cadeia de suprimentos é definido como a integração de atividades de procurar materiais, transformar a matéria-prima em produto e finalmente destinar ao consumidor final (HEIZER e RENDER, 2001). A cadeia de suprimentos também é considerada como toda a relação existente entre fornecedores e clientes.

Um dos pontos cruciais para se obter eficiência no gerenciamento da cadeia de suprimentos é o gerenciamento dos fornecedores, devido ao fato dos custos de matéria-prima e componentes serem a parte significativa da formação do custo do produto final (GOFFIN; SZWEJCZEWSKI e NEW, 1997). A seleção de fornecedores, desta forma, se torna uma atividade de alto impacto no processo estratégico de gerenciamento. O crescimento da terceirização de alguns processos nos últimos anos trouxe uma vulnerabilidade e uma dificuldade ainda maior na seleção dos fornecedores que devem integrar a cadeia de suprimento (CHOI e HARTLEY, 1996).

Desta forma, as empresas têm optado por operar com um número limitado de fontes confiáveis com as quais estabelecem relações comerciais de longo prazo. Neste contexto, a escolha do fornecedor apropriado é uma das mais importantes decisões de negócio. Embora até não muito tempo atrás a seleção do fornecedor fosse norteadada principalmente pelo fator preço/custo, gradativamente outros critérios passaram a ser levados em conta no processo decisório, como por exemplo, qualidade, prazo de entrega, capacidade e flexibilidade (HO, XU e DEY, 2010).

Esta nova visão tem sido aplicada no segmento de autopeças fundidas pelo processo de alta pressão (*die casting process*). As empresas que atuam neste ramo precisam realizar altos investimentos no projeto e manufatura de moldes a cada vez que negociam um novo contrato com seus clientes ou quando necessitam substituir um molde já desgastado pelo uso. Elas têm percebido que o custo do molde ao longo de sua vida útil é muito mais importante que o preço inicial e tem aceitado realizar um desembolso razoável no ato da compra com acordo de redução nos pedidos seguintes.

A carcaça da transmissão para veículos de passeio tem sido tipicamente produzida por este processo. Obter um fundido deste tipo com qualidade e produtividade é uma tarefa difícil que depende muito da capacidade da fundição, de seu corpo técnico e principalmente do molde utilizado. A construção de moldes para peças a serem produzidas sob pressão consome tempo e envolve um grande número de detalhes que lhe aumentam a complexidade. A escolha de um fornecedor para este tipo de molde está condicionada a múltiplos critérios, que podem ser sobrepostos ou conflitantes, de natureza qualitativa ou quantitativa, alguns deles a serem minimizados e outros maximizados. Por estas razões, torna-se difícil avaliar e escolher a melhor fonte de fornecimento se um processo estruturado de seleção não for utilizado.

Ho, Dey e Xu (2010), realizaram uma revisão da literatura publicada na última década sobre o uso de métodos de decisão envolvendo múltiplos critérios para avaliação e seleção de fornecedores. Uma das conclusões dos autores é que o critério preço, muito utilizado no passado, não está sendo aplicado isoladamente no processo decisório. Qualidade, entrega e flexibilidade compõem este último contribuindo para uma abordagem mais robusta na seleção de fornecedores da cadeia de suprimento. O AHP é ressaltado no trabalho como uma das ferramentas mais populares e apropriadas a apoiar este processo.

## 1.2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é aplicar o AHP para seleção de um fornecedor de moldes para fundição de autopeças. Serão exploradas no capítulo a seguir as principais características do AHP que suportam a utilização do mesmo para este fim.

Espera-se, com a aplicação deste método, minimizar a subjetividade no processo decisório da seleção de fornecedores.

## 1.3. DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Este estudo foi desenvolvido em uma empresa localizada no interior de São Paulo, afiliada a um dos mais tradicionais fabricantes europeus de fundidos em ligas leves, que optou por não expor sua identidade neste estudo. Esta indústria tem como fonte principal de receita a produção de autopeças em ligas de alumínio fundidas sob pressão.

A motivação para este estudo foi um contrato fechado entre a empresa e um de seus maiores clientes, uma fábrica de transmissões automobilísticas, para o fornecimento de um novo modelo de carcaça de transmissão.

Embora a organização tenha mantido em seu corpo técnico engenheiros e especialistas com experiência em projeto e fabricação de moldes, por opção estratégica feita alguns anos atrás, ela decidiu manter em seus ativos apenas os recursos necessários a manutenção dos moldes em uso e adquirir novos no mercado.

Os técnicos da área de moldes da empresa onde o estudo foi desenvolvido e de sua operação principal na Europa contribuíram significativamente na indicação dos fatores que consideraram mais significativos para nortear a seleção do fornecedor. Este fato representa a

limitação principal da pesquisa, isto é, a escolha final, embora guiada por um procedimento analítico, tem forte influência da cultura e do conhecimento técnico existente nesta empresa em particular.

Três fornecedores foram avaliados como fontes potenciais de fornecimento para o molde a ser usado na produção da carcaça. Para esta avaliação foram feitas visitas aos potenciais fornecedores e posteriormente solicitado a cada um deles a submissão de orçamento técnico-financeiro para o molde.

#### 1.4. ABORDAGEM METODOLÓGICA

Segundo classificação metodológica encontrada em Silva e Menezes (2001) este estudo caracteriza-se como pesquisa aplicada uma vez que tem como objetivo produzir conhecimentos para aplicação prática. Do ponto de vista da abordagem do problema levantado, a pesquisa define-se como qualitativa, pois fica clara a interpretação de fenômenos e a atribuição de significados. O ambiente natural é a fonte direta para coleta de dados.

Quanto aos objetivos, o estudo é de natureza exploratória pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema, tornando-o mais explícito. Envolve levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que tiveram experiências com o assunto pesquisado e possui, de forma geral, estrutura de pesquisa bibliográfica e de estudo de caso.

#### 1.5. ESTRUTURA

Este trabalho está estruturado em seis partes. O primeiro, capítulo introdutório, é composto de contextualização, objetivo, delimitação do trabalho, abordagem metodológica e esta estruturação.

O capítulo seguinte apresenta a revisão da literatura necessária para a sustentação deste estudo. Esta revisão foi subdividida nos temas de fundição sob pressão, moldes para fundição sob pressão, o AHP, cálculos no AHP, medição do desempenho e escore final do fornecedor.

No capítulo 3 é oferecido uma passo a passo da aplicação do método desde a visita técnica aos potenciais fornecedores até a seleção do fornecedor com maior escore.

No capítulo seguinte são apresentados os resultados e discussão. Esta seção foi subdividida em: Identificação dos critérios, sub-critérios e atributos; Priorização dos critérios, sub-critérios e atributos, o cálculo dos pesos de critérios e sub-critérios; Análise de sensibilidade.

No quinto capítulo, apresenta-se a conclusão deste estudo e comentários pertinentes à experiência da aplicação do método. No sexto e último capítulo é oferecida uma análise crítica da aplicação do método, finalizando com possíveis alternativas de continuidade em trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO

Segundo a Associação Norte Americana de Fundição Sob Pressão (North American Die Casting Association, NADCA) as primeiras iniciativas em fundição sob pressão (die casting process) datam de meados do século XIX e devem-se ao trabalho pioneiro de Sturges com ligas de Estanho e de Chumbo. No final deste mesmo século o processo passou a ser usado comercialmente para produzir peças para fonógrafos e caixas registradoras evoluindo nas primeiras décadas do século XX para a produção em massa de peças produzidas em ligas de Cobre, Zinco, Magnésio e Alumínio com diferentes formas e graus de complexidade. Os processos de injeção mais modernos, com pressões que podem ser superiores a 300 kg/cm<sup>2</sup>, permitem obter fundidos de alta integridade, com pouco sobremetal para usinagem (near net-shape) e excelente acabamento superficial.

A Associação Brasileira de Alumínio (ABAL) descreve que, embora o óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) já estivesse presente há milênios em alguns metais, a primeira obtenção de alumínio metálico, realizada por via química, deve-se a Henry Saint-Claire Deville e ocorreu em meados do século XIX, coincidindo com os primórdios do processo de fundição sob pressão. Hoje em dia, a produção de alumínio supera a soma de todos os outros metais não ferrosos e os maiores produtores mundiais são os Estados Unidos e o Canadá, embora nenhum deles possua jazidas de bauxita em seu território, dependendo exclusivamente da importação. A bauxita é o minério mais importante para a produção de alumínio, contendo de 35% a 55% de óxido de alumínio e o Brasil tem a terceira maior reserva do minério no mundo, com jazidas localizadas na Amazônia, em Minas Gerais e no sudeste do país.

Analisando-se os dados divulgados pela NADCA, percebe-se que um dos processos mais utilizados nas fundições para a produção de peças complexas em ligas de alumínio é a fundição sob pressão que responde por um terço da produção mundial de fundidos. O maior cliente deste processo é a indústria automobilística que consome 44% desta fração e projeta crescimento no uso de ligas de alumínio em automóveis para os próximos anos (NADCA, 2005).

Segundo pesquisas realizadas pela Associação Européia de Alumínio (European Aluminum Association - EAA) o conteúdo de componentes veiculares fabricados com este

metal subiu de 50 kg em 1990 para 132 kg em 2005 e deve atingir 157 kg em 2010 (EAA, 2008). No Brasil, a produção nacional de autoveículos, superior a 3.000.000 de unidades por ano desde 2007 (ANFAVEA, 2010), expressa perfeitamente o tamanho do mercado para peças técnicas de alumínio fundidas sob pressão (Figura 1).

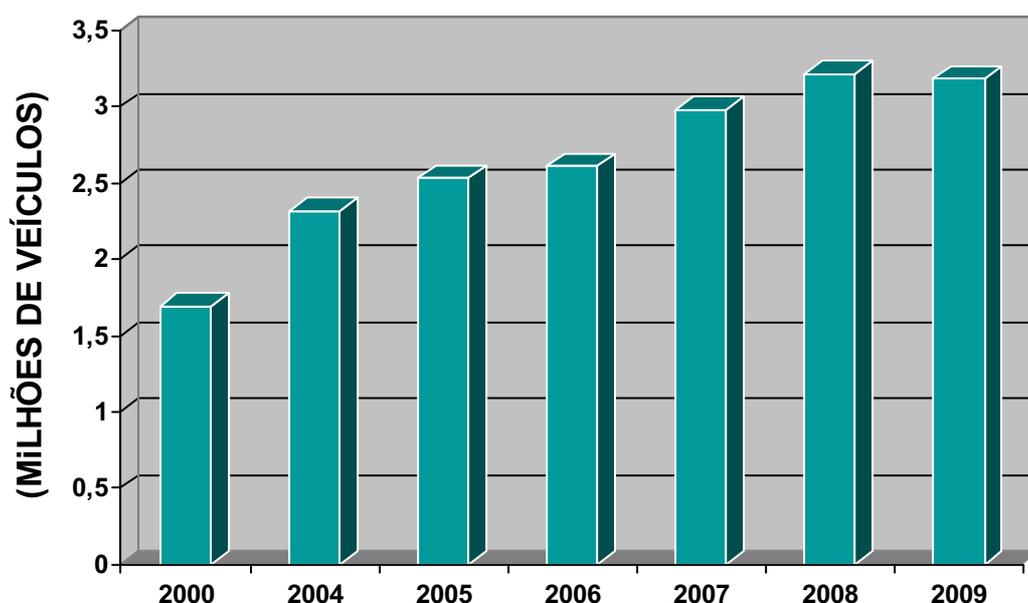


Figura 1 – Evolução da fabricação de veículos na década atual

## 2.2 MOLDES PARA FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO

A fundição sob pressão é um processo de manufatura usado para produzir peças metálicas com boa precisão dimensional e acabamento superficial. O processo consiste na injeção de metal líquido, em grande velocidade e alta pressão, em um molde de aço, dividido para facilitar a extração do fundido em, no mínimo, duas partes: o meio-molde tampa e o meio-molde dos ejetores. No meio-molde tampa é incorporado o canal de entrada (sprue hole) por onde se dá o ingresso de metal líquido na cavidade. No meio-molde dos ejetores localizam-se os canais de ataque e alimentação do fundido e os ejetores necessários para a retirada da peça ao final do ciclo. O conjunto do molde ainda inclui a cavidade com o inserto (obtido por usinagem de precisão, sua figura é o negativo da peça a ser injetada), os pinos guia de alinhamento dos dois semi-moldes, linhas de refrigeração e os machos fixos e móveis, usados para obter determinados perfis no fundido (HERMAN, 1992; ANDRESEN, 2005; BAR-MEIR, 2009). Conforme ilustrado na Figura 2, existem quatro tipos de moldes: (a) com cavidade única destinada a produção de somente um componente (single-cavity die); (b) com

múltiplas cavidades usadas para produzir várias peças com as mesmas características (multiple-cavity die); (c) com múltiplas cavidades para a produção de peças de diferentes geometrias e aplicações (combination die) e finalmente (d) com múltiplas cavidades usadas para integrar peças diferentes, porém de um mesmo conjunto (unit die).

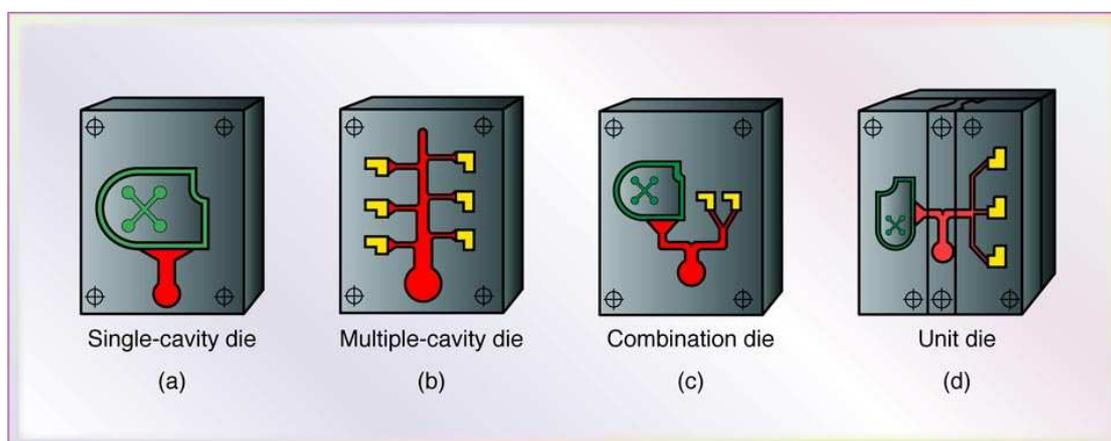


Figura 2 - Configuração de cavidades em molde de fundição sob pressão  
Fonte: NADCA (disponível em [www.diecasting.org](http://www.diecasting.org))

Todas as partes do molde que têm contato com o alumínio líquido são fabricadas em aço para trabalho a quente que tipicamente contém em torno de 5% de cromo, 1% de molibdênio, 1% de vanádio e 0,40% de carbono. A erosão provocada pela alta velocidade com que o metal fundido colide com as paredes do molde, as microtrincas causadas pela fadiga térmica devido ao aquecimento e resfriamento alternado na superfície do molde durante o ciclo e a aderência natural da liga de alumínio em estado líquido ao aço do molde durante o processo de preenchimento do molde e solidificação são alguns dos mecanismos característicos que levam ao desgaste do molde (KLOBCAR, TUSEK e TALJAT, 2008; KOSEC, 2008; MUHI *et al.*, 2010). Estes fatores são mitigados pela submissão dos componentes que suportam as altas tensões térmicas existentes no processo ao tratamento de tempera e revenido, que lhes confere a máxima homogeneidade de propriedades entre o núcleo e a superfície e, posteriormente, por tratamento termoquímico de nitretação para enriquecer a superfície do aço com nitrogênio, formando uma camada rica em nitretos, de natureza cerâmica, alta dureza, baixo coeficiente de atrito e alta resistência a desgaste (YOSHIDA, SARTORI e ARRUDA, 2004). A seleção criteriosa do aço usado na fabricação do molde e a aplicação dos tratamentos térmicos e termoquímicos apropriados são fundamentais para que a vida útil do molde se prolongue por milhares de ciclos.

Para ser usada em produção, o molde é montado a uma injetora de maneira que, durante o ciclo de trabalho, o meio-molde tampa permanecerá estacionário e o meio-molde dos ejetores será movimentado. Na produção de peças em ligas de alumínio são utilizadas injetoras de câmara fria, ilustradas sinteticamente na Figura 3. Nestas máquinas o metal líquido é transportado, através de uma concha manual ou de um sistema automático de transferência, do forno de espera para uma câmara cilíndrica existente no pistão de injeção da máquina. Esta câmara, uma vez preenchida, é vedada hidraulicamente e usada para direcionar o metal sob alta pressão para dentro do molde.

As máquinas injetoras são ainda classificadas segundo a pressão que exercem sobre o molde. A força de fechamento destas máquinas pode variar entre 280 e 4000 toneladas, sendo a escolha regida em geral pela geometria do fundido que se deseja produzir.

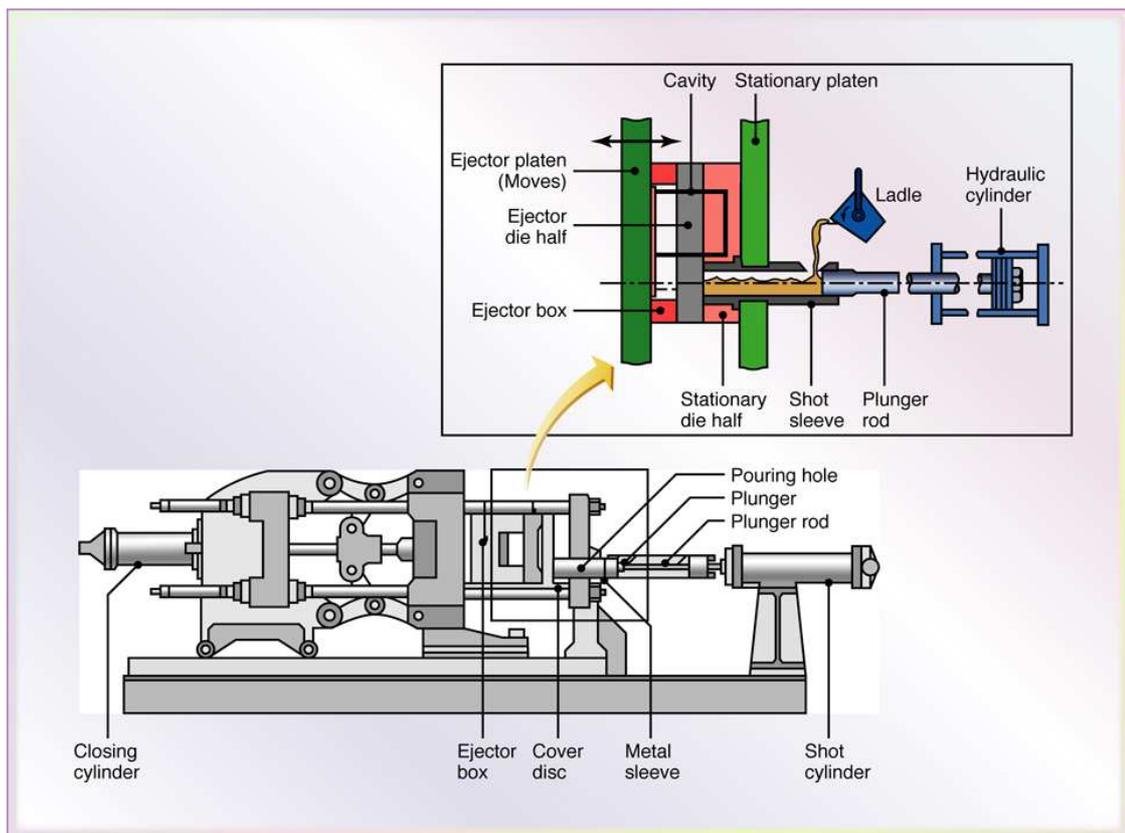


Figura 3 – Representação de uma injetora de câmara fria

Fonte: Kalpakjian e Schmid, 2006

O ciclo se inicia com as duas metades do molde rigidamente posicionadas uma contra a outra, por força do mecanismo de fechamento da máquina. O metal líquido é então injetado no molde, em fração de segundos, onde se solidificará rapidamente. Na sequência, as duas partes do molde se abrem e o fundido é ejetado. O ciclo é completado em poucos minutos,

razão pela qual o processo de fundição sob pressão é a técnica mais rápida que se dispõe para produzir peças não ferrosas com razoável grau de precisão.

Nas operações mais modernas os parâmetros mais importantes de cada ciclo como, por exemplo, a velocidade e a pressão do metal e a temperatura do molde, são monitorados com auxílio de microprocessadores por meio dos quais é possível garantir consistência de processo ao longo do tempo.

Em geral há varias etapas presentes no projeto e fabricação de moldes para fundição sob pressão de peças em ligas de alumínio, como ilustrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Etapas do projeto e da fabricação do molde

Fonte: adaptado de Andresen, 2005

| Etapa | Atividade   | Fase                             |
|-------|---|----------------------------------|
| 1     | Projeto conceitual do produto fundido apoiado por criação de protótipos               | PROJETO DO PRODUTO               |
| 2     | Desenvolvimento do modelo sólido (CAD)  |                                  |
| 3     | Validação da viabilidade de manufatura  |                                  |
| 4     | Pré-projeto do molde  | PROJETO DO MOLDE                 |
| 5     | Projeto do sistema de alimentação (CAD)   |                                  |
| 6     | Simulação virtual do fluxo de alimentação e do gradiente de solidificação (simulação) |                                  |
| 7     | Projeto do processo (CAD)   |                                  |
| 8     | Projeto mecânico do molde   |                                  |
| 9     | Validação do projeto do molde   | CONSTRUÇÃO DO MOLDE              |
| 10    | Desenvolvimento dos programas de usinagem (CAM) e simulação virtual das operações     |                                  |
| 11    | Pré-usinagem (desbaste e furações) dos componentes do molde                           |                                  |
| 12    | Tratamento Térmico dos componentes do molde   |                                  |
| 13    | Usinagem final dos componentes do molde   |                                  |
| 14    | Montagem e ajuste do molde  |                                  |
| 15    | Inspeção dimensional do molde   | APROVAÇÃO DO MOLDE PARA PRODUÇÃO |
| 16    | Obtenção de amostras para inspeção e controle   |                                  |
| 17    | Inspeção dimensional das amostras e aprovação do molde para produção                  |                                  |

O projeto e a fabricação de moldes têm passado nos últimos anos por significativa evolução devida principalmente a ajuda de programas computadorizados (SHEHATA e ABD-ELHAMID, 2003).

A interação entre os sistemas CAD/CAM/CAE em uma fundição sob pressão, é apresentado conceitualmente na Figura 4 (YUE et al., 2003). O modelo sólido do produto é produzido a partir do desenho convencional e nos primeiros estágios do projeto do molde ele é usado como referência para a construção do fundido, sendo-lhe adicionado o sistema de alimentação, o sobremetal para usinagem, as compensações para a contração de mudança de estado e os ângulos de saída que irão facilitar a extração do fundido ao final do ciclo de injeção.

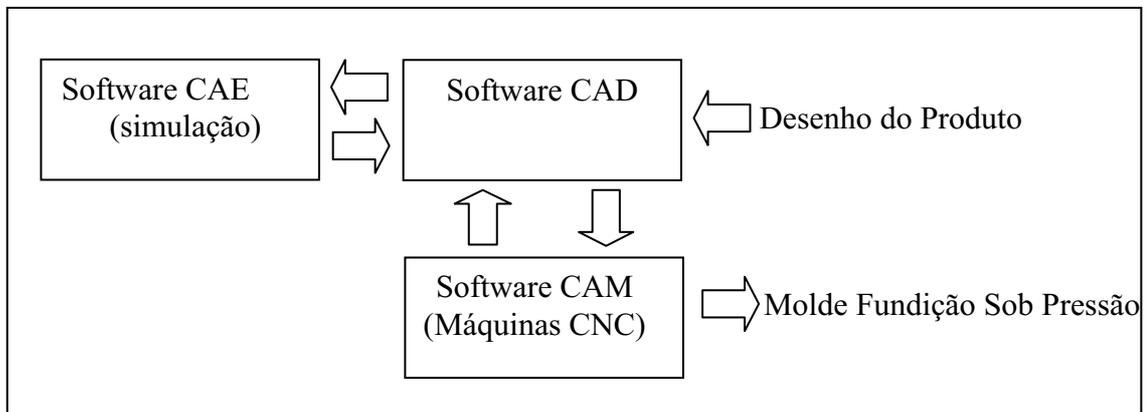


Figura 4 - Esquema geral de um sistema integrado CAD/CAE/CAM usado no projeto de molde de fundição sob pressão

Fonte: adaptado de Yue et al., 2003

Um modelo sólido de um corpo de bomba de água fundida sobre pressão é apresentado na Figura 5 para ilustrar o resultado desta etapa do projeto.

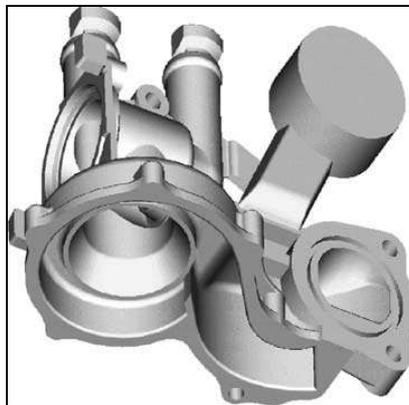


Figura 5 - Modelo sólido de um Corpo de Bomba de Água fundida sob pressão

Fonte: Yue et al., 2003

Na etapa seguinte do projeto avalia-se a adequação do sistema de alimentação proposto, quanto ao fluxo de metal no enchimento da cavidade do molde e a solidificação direcional do fundido. Eventuais problemas são indicados precocemente nesta etapa e podem ser abordados pelos projetistas e solucionados antes que o molde comece a ser realmente produzida. Um exemplo relativo a um trecho de um programa de simulação realizada para uma Carcaça da Transmissão é apresentado ilustrativamente na Figura 6.

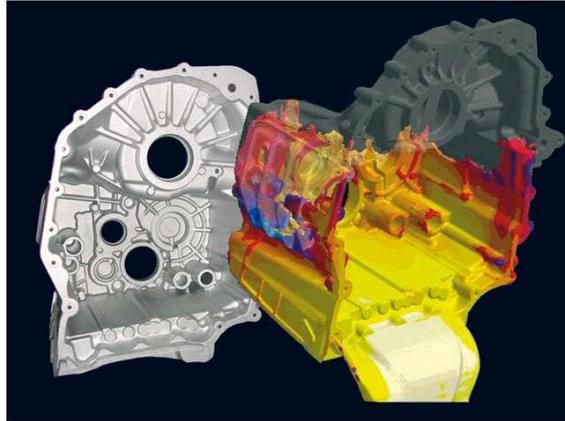


Figura 6 - Trecho de simulação de solidificação de uma Carcaça de Transmissão fundida sob pressão  
*Fonte: Magmasoft Co. (disponível em <http://www.magma-soft.de>)*

Finalmente o modelamento sólido tridimensional do conjunto do molde é completado, incluindo os lados Tampa e Ejetor do molde, o produto fundido, os machos metálicos, o sistema de alimentação e os canais de refrigeração, habilitando o desenvolvimento do projeto mecânico e o início da manufatura do molde. Um exemplo de modelamento sólido do conjunto do molde do Corpo da Bomba de Água, já apresentada anteriormente, é ilustrado na Figura 7.

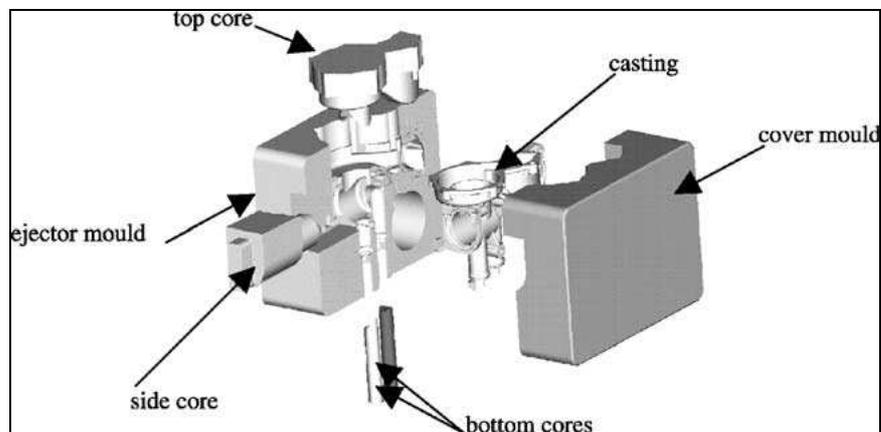


Figura 7 - Ilustração do modelo sólido do molde do Corpo de Bomba de Água  
*Fonte: Yue et al., 2003*

Concluído o projeto dá-se início a manufatura do molde cujo ponto de partida é a criação dos programas de usinagem (CAM) elaborados a partir dos arquivos do CAD. Antes que sejam transferidos para as máquinas ferramentas, estes programas de usinagem são simulados virtualmente quando então o projetista se assegura que os caminhos de usinagem estão otimizados e que as operações serão realizadas sem que haja colisão acidental da ferramenta de corte com o produto.

Um exemplo desta simulação é ilustrado na Figura 8 para um subconjunto do molde do Corpo da Bomba de Água.

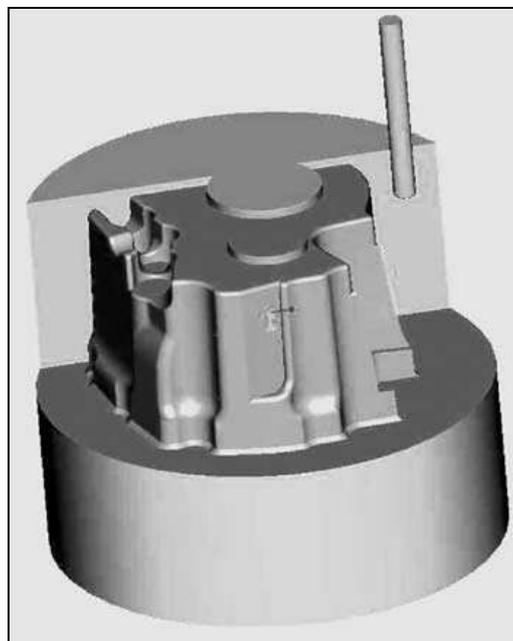


Figura 8 - Ilustração da simulação de um programa de usinagem para um componente do molde do Corpo de Bomba de Água

*Fonte: Yue et al., 2003*

Concluída a primeira etapa da usinagem dos componentes do molde (em geral operações de desbaste e furação) segue-se o tratamento térmico e, após isto, a usinagem final, de precisão, realizada normalmente em centros de usinagem dotados de múltiplos eixos e com capacidade para altas velocidades de corte. Um exemplo ilustrativo de um centro de usinagem horizontal é apresentado na Figura 9 e os princípios de um centro de usinagem vertical de cinco eixos são ilustrados na Figura 10.

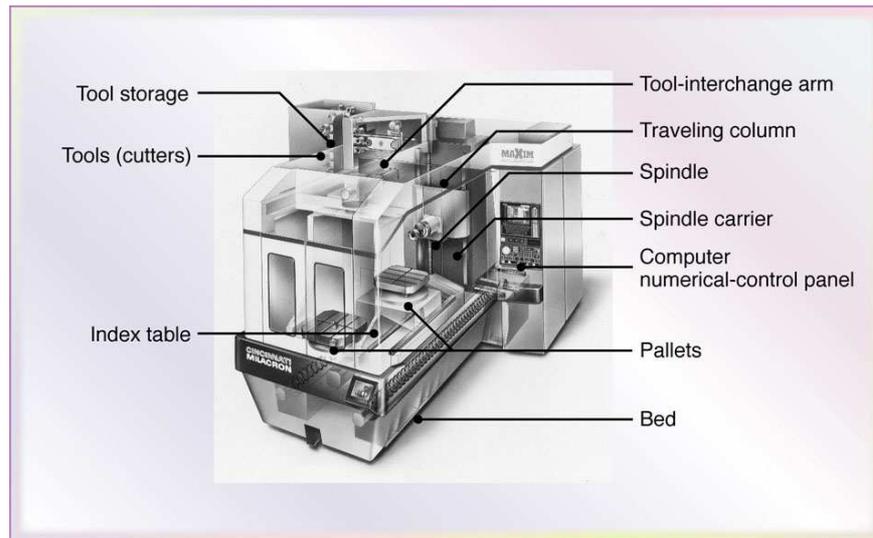


Figura 9 - Ilustração de um centro de usinagem com eixos horizontais  
Fonte: Cincinnati Machine LLC (disponível em: <http://www.cinmac.com>)

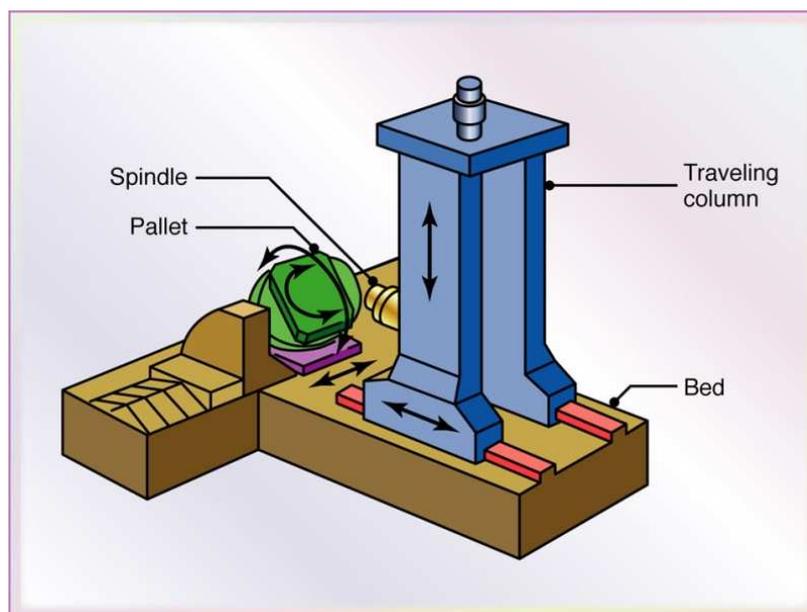


Figura 10 - Ilustração dos princípios de um centro de usinagem com cinco eixos  
Fonte: Toyoda Machinery (disponível em: <http://www.toyodausa.com>)

Neste último caso, percebe-se que além dos movimentos lineares (em três eixos) o porta-peça (pallet) pode girar ao redor de dois eixos adicionais (e daí a terminologia “cinco eixos”) o que confere a possibilidade de usinar formas complexas, como normalmente se encontra nos moldes de fundição sobre pressão. Estes equipamentos são governados por sistemas dotados de controle numérico por computador (CNC) e possuem capacidade para armazenagem de múltiplos tipos de ferramentas de corte que, mediante comando do programa de usinagem, são automaticamente substituídos durante a operação de usinagem.

Terminada esta etapa os componentes do molde são ajustados e montados para formar o conjunto dos moldes seguem para a produção piloto de amostras. Nesta nova fase, dois objetivos são perseguidos: Certificar-se que todos os elementos necessários à instalação/troca/operação do molde na injetora foram considerados durante o projeto e funcionam da maneira que havia sido conceituado anteriormente (PERINI, IKONI e MARI, 2009); Obter amostras em conformidade com os requisitos metalúrgicos e dimensionais.

Finalmente, as amostras obtidas são submetidas à inspeção dimensional verificando-se, a partir dos resultados obtidos, se o produto está em conformidade com os requisitos e ainda a adequação dos pressupostos adotados no projeto do molde. A inspeção dimensional é habitualmente realizada em máquina de medir por coordenadas (CMM), veja exemplo ilustrativo na Figura 11, com o programa de medição desenvolvido a partir do próprio modelo CAD utilizado na construção do molde.

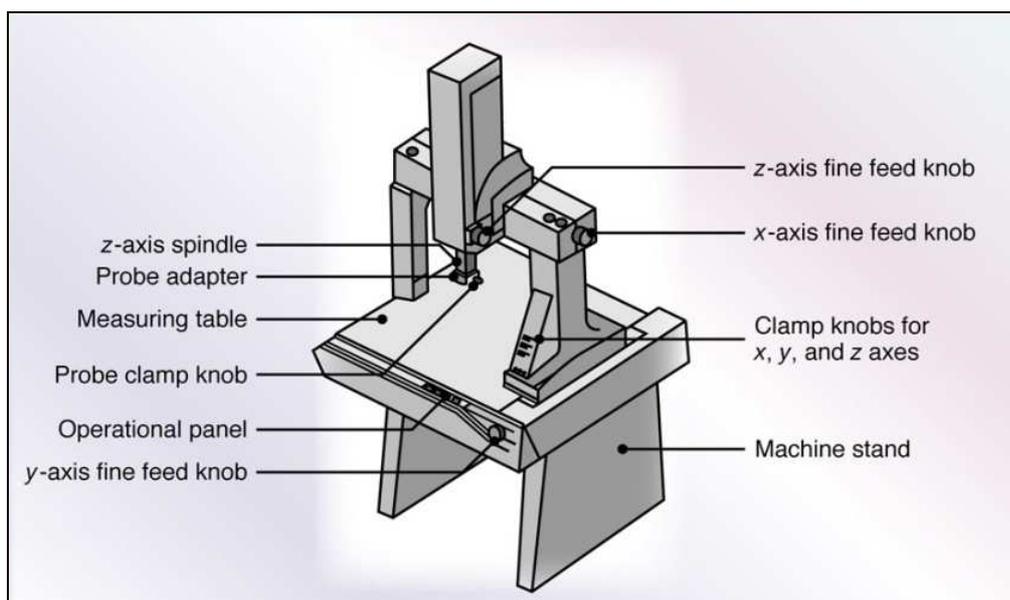


Figura 11 - Ilustração esquemática de uma máquina de medir por coordenadas (CMM)  
Fonte: Kalpakjian e Schmid, 2006

### 2.3. PROCESSO HIERÁRQUICO ANALÍTICO

O tema da seleção de fornecedores tem sido largamente estudado nos últimos anos (DE BOER, LABRO e MORLACCHI, 2001; HO, XU e DEY, 2010; WEBER, CURRENT e BENTON, 1991). Um dos métodos multicritério mais aplicados para esta finalidade é o AHP utilizado em combinação com outras ferramentas ou de maneira isolada (HO, XU e DEY, 2010).

O AHP foi criado por Saaty em 1977 e é um método de decisão multicritério pelo qual os fatores de decisão, uma vez selecionados, são organizados em estrutura hierárquica descendente partindo de um objetivo absoluto para níveis sucessivo de critérios, sub-critérios e alternativas. Por fim este processo ainda pode ser mensurado através de um índice de consistência. Duas características principais diferenciam o AHP dos demais métodos que suportam o processo decisório:

(a) Valores subjetivos (qualitativos) e objetivos (quantitativos) podem ser combinados durante o processo e integrados em um único escore global;

(b) Pode-se medir a consistência do processo quanto aos escores atribuídos e, devido a isto, não é incomum que estes precisem ser revisados algumas vezes.

Quando a estrutura hierárquica estiver sendo elaborada, alguns detalhes relevantes devem ser abordados: representar o problema tão inteiramente o quanto possível, entretanto sem prejuízo a sensibilidade para a substituição de elementos; considerar o ambiente que envolve o problema; identificar as questões e atributos que contribuem para a solução; e identificar os participantes associados com o problema.

O AHP é baseado em comparações pareadas entre fatores. Saaty (1980) desenvolveu um critério para esta comparação que consiste em transformar um julgamento verbal, que vai de igualmente importante até extremamente mais importante, em um julgamento numérico que vai respectivamente de 1 a 9. Por fim o princípio da composição hierárquica ou da síntese de prioridades é aplicado para produzir uma prioridade global (veja Figura 12).

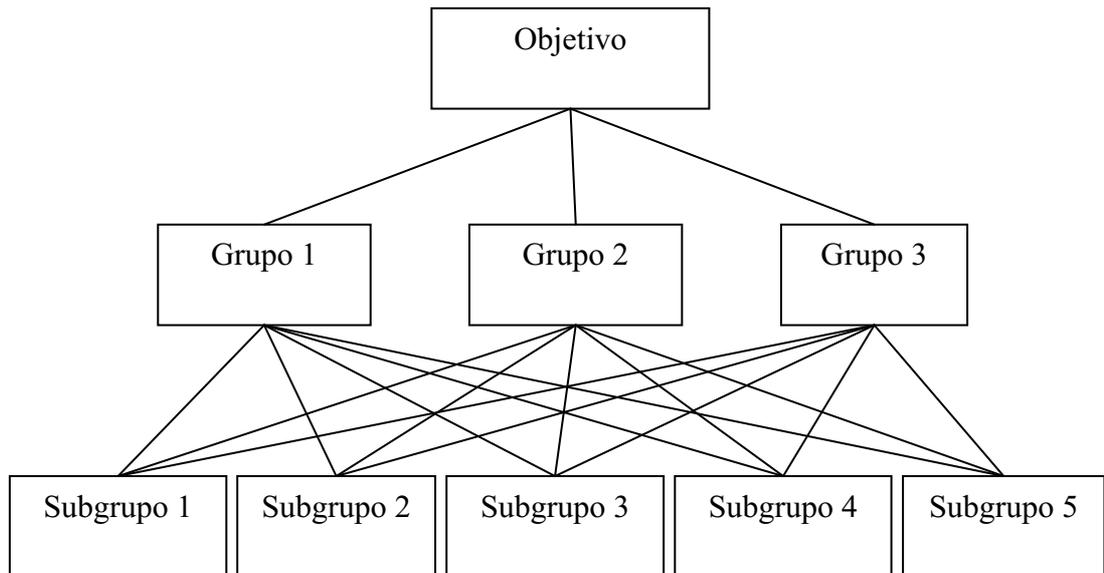


Figura 12 – Arranjo de grupos e subgrupos

Dentre os estudos que utilizaram o AHP pode-se mencionar as publicações de Vargas (1990) que sintetizou as aplicações até então abordadas pelo método, Akarte et al., (2001), que introduziram um sistema ancorado no uso da internet para avaliação de fornecedores de fundidos com base em 18 critérios; de Chan e Chan (2004) que apresentam o processo de escolha do fornecedor de um fabricante de equipamentos de montagem de semicondutores com base em seis critérios e vinte sub-critérios de avaliação. O AHP, conforme descrito por Vaydia e Kumar (2006), tem também sido utilizado em diversos outros segmentos de negócios, como, por exemplo, em organizações governamentais, para desenvolvimento de produtos, alocação de recursos e seleção de projetos dentro de determinado portfólio. Hou e Su (2007) aplicaram o método para identificar o fornecedor apropriado para dois componentes de cartuchos de impressão, considerando fatores de influência interna e externa ao negócio. Salomon e Whitaker (2007) utilizaram o método para ilustrar como a equipe de administração de manufatura de uma empresa nacional conseguiu priorizar a lista de atividades-chaves na Gestão de Produção, usando os indicadores de desempenho desta organização.

### 2.3.1 CÁLCULOS NO AHP

No AHP a priorização dos fatores é iniciada pela comparação pareada entre eles atribuindo-se como resultado um escore da escala de importância relativa (SAATY, 1990), veja Quadro 2, considerado apropriado pelo avaliador.

Quadro 2 - Escala de importância relativa

| Intensidade | Definição               | Explicação  |
|-------------|-------------------------|---|
| 1           | Igual importância       | Os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo   |
| 3           | Importância moderada    | Um fator é moderadamente mais importante do que o outro |
| 5           | Forte importância       | Um fator é mais importante do que o outro               |
| 7           | Importância muito forte | Um fator é muito mais importante do que o outro         |
| 9           | Importância extrema     | Um fator é extremamente mais importante do que o outro  |
| 2, 4, 6 e 8 | Valores intermediários  |   |

Os escores determinados são usados para preencher uma matriz de comparações entre critérios, veja Quadro 3, a partir da qual se torna possível o cálculo dos pesos.

Quadro 3 – Matriz de comparações entre os critérios

| Critério | $C_1$     | $C_2$     | $C_3$     | ... | $C_n$     | Peso  |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----|-----------|-------|
| $C_1$    | 1         | $a_{1,2}$ | $a_{1,3}$ | ... | $a_{1,n}$ | $p_1$ |
| $C_2$    | $a_{2,1}$ | 1         | $a_{2,3}$ | ... | $a_{2,n}$ | $p_2$ |
| $C_3$    | $a_{3,1}$ | $a_{3,2}$ | 1         | ... | $a_{3,n}$ | $p_3$ |
| ...      | ...       | ...       | ...       | ... | ...       | ...   |
| $C_n$    | $a_{n,1}$ | $a_{n,2}$ | $a_{n,3}$ | ... | 1         | $p_n$ |

No Quadro 3 consideram-se  $n$  critérios ( $C_1, C_2, \dots, C_n$ ) a serem comparados e a importância relativa de  $C_i$  com respeito a  $C_j$  tem intensidade  $a_{ij}$ . A matriz resultante é chamada *recíproca* e está sujeita as restrições  $a_{ii} = 1$ , qualquer que seja  $i$ , e  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ , para  $i \neq j$ . Os pesos são consistentes se forem transitivos, isto é,  $a_{ik} = a_{ij}a_{jk}$  para qualquer  $i, j$  e  $k$ . Tal matriz só poderia existir se os valores de  $a_{ij}$  fossem calculados a partir de dados medidos com exatidão. A partir daí se encontraria um vetor  $\omega$  de ordem  $n$  tal que  $A\omega = \lambda\omega$ . Em tal matriz,  $\omega$  é dito ser um autovetor de ordem  $n$  e  $\lambda$  é um autovalor. Para uma matriz consistente  $\lambda = n$ .

Para matrizes que envolvem o julgamento humano, a condição  $a_{ik}=a_{ij}a_{jk}$  não se verifica pois julgamentos humanos são inconsistentes em maior ou menor grau. Em tal caso o vetor  $\omega$  satisfaz a equação  $A\omega=\lambda_{\max}\omega$  e  $\lambda_{\max}\geq n$ . A diferença, caso exista, entre  $\lambda_{\max}$  e  $n$  é uma indicação da inconsistência dos julgamentos. Se  $\lambda_{\max}=n$  então os julgamentos são consistentes. Finalmente um Índice de Consistência (CI) pode ser calculado por:

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)} \quad (1)$$

A Razão de Consistência (CR) é calculada dividindo-se o Índice de Consistência pela constante correspondente ao tamanho da matriz onde estão armazenados os escores provenientes das comparações, veja Tabela 1.

Tabela 1 - Índice randômico médio do AHP

| Tamanho da matriz | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Constante         | 0,00 | 0,00 | 0,58 | 0,90 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 |

Fonte: adaptado de Saaty (1990)

Saaty sugere que o conjunto de julgamentos é inconsistente e não confiável quando a Razão de Consistência exceder 10%.

Existem diversas maneiras para se calcular o autovetor. Multiplicando-se as entradas em cada linha da matriz e então tomando a raiz enésima do produto oferece uma boa aproximação à resposta correta. As raízes enésimas são somadas e o resultado é usado para normalizar os elementos do autovetor transformando o valor da soma na unidade. Para melhor descrever a marcha de cálculos envolvida no método, vamos admitir um exemplo hipotético, encontrado em Coyle (2004), representado por uma matriz onde existem quatro critérios, A, B, C e D, em julgamento, veja Tabela 2.

Tabela 2 - Cálculo do AHP (Exemplo Hipotético)

|               | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> | <b>D</b> | Raiz quarta do produto dos valores | Autovetor    |
|---------------|----------|----------|----------|----------|------------------------------------|--------------|
| <b>A</b>      | 1        | 1/3      | 1/9      | 1/5      | 0,293                              | 0,058        |
| <b>B</b>      | 3        | 1        | 1        | 1        | 1,316                              | 0,262        |
| <b>C</b>      | 9        | 1        | 1        | 3        | 2,279                              | 0,454        |
| <b>D</b>      | 5        | 1        | 1/3      | 1        | 1,136                              | 0,226        |
| <b>TOTAIS</b> |          |          |          |          | <b>5,024</b>                       | <b>1,000</b> |

Na matriz em referência a raiz quarta para a primeira linha é 0,293 e dividindo-se este valor por 5,024 encontra-se 0,058 como o primeiro elemento no autovetor.

Analogamente se calculam os demais elementos do autovetor da importância relativa dos critérios A, B, C e D que resultam em (0,058; 0,262; 0,454; 0,226). Assim conclui-se que C é o critério mais importante, seguido por B e D, que tem valores próximos, e finalmente o critério A que é muito menos significativo.

O passo seguinte é calcular  $\lambda_{\max}$  necessário para se obter o Índice de Consistência e a Razão de Consistência. Para isto primeiramente toma-se o somatório dos produtos entre cada escore da primeira linha da matriz pelo elemento correspondente do autovetor, isto é:

$$(1)(0,058)+(1/3)(0,262)+(1/9)(0,454)+(1/5)(0,226)=0,240$$

Analogamente, repetindo-se esta etapa para as três linhas seguintes se obtém respectivamente (1,116; 1,916; 0,928). O vetor formado pelos quatro elementos, isto é, (0,240; 1,116; 1,916; 0,928) é o produto  $A\omega$  e a teoria do AHP diz que  $A\omega=\lambda_{\max}\omega$  portanto é possível obter quatro estimativas de  $\lambda_{\max}$  pelo simples expediente de dividir cada componente deste vetor pelo elemento correspondente do autovetor. Isto feito encontra-se  $0,240/0,0058=4,137$  e analogamente 4,259; 4,220 e 4,110. A média destes valores é 4,18 que se adota como a estimativa para  $\lambda_{\max}$ .

O Índice de Consistência para a matriz é calculado pela expressão (1) e, desde que  $n=4$ , encontra-se  $CI=0,060$ . O passo final é determinar a Razão de Consistência, que se

calcula por  $CR=0,060/0,90=0,0677$ . Como este valor é menor do que 10% concluí-se que os julgamentos estão consistentes.

#### 2.4. MEDIÇÃO DO DESEMPENHO

A etapa seguinte no estudo de caso foi a mensuração do desempenho do fornecedor que depende do tipo de critério considerado. Para os critérios objetivos o desempenho foi avaliado pelo método da normalização, usando-se os próprios dados conhecidos através do preenchimento do orçamento. Como na presente aplicação estes critérios são ótimos quando em valores mínimos, a medida de desempenho relativa do fornecedor é calculada normalizando-se o recíproco destes valores. O fator preço do ferramental, por exemplo, enquadra-se nesta condição.

Suponha que os três fornecedores F1, F2 e F3 tenham orçado o ferramental em R\$ 1.140.000,00; R\$ 1.520.000,00 e R\$ 1.425.000,00 respectivamente. Neste caso o desempenho de cada um dos três fornecedores neste critério seria 0,392; 0,294 e 0,314 respectivamente.

Para os critérios subjetivos o desempenho foi medido utilizando-se *ratings* (SAATY, 1990; SAATY, 1994), isto é, transformando julgamentos qualitativos (atributos) em quantitativos, através da metodologia do AHP, seguindo procedimento análogo ao empregado para as comparações dos critérios e sub-critérios.

Para determinar o atributo mais apropriado a cada um dos sub-critérios utilizados, representantes da empresa onde este estudo de caso foi desenvolvido visitaram as instalações dos fornecedores em potencial fazendo avaliações *in-loco*. Quando em determinado sub-critério o candidato fornecedor demonstrava dispor de mais de um atributo, seu desempenho foi calculado somando-se todos os *ratings* a eles associados.

Por exemplo, se o histórico do fornecedor F1 evidenciava que sua experiência em projetos limitava-se a ferramentais de baixa complexidade e se o fornecedor F2 demonstrava já ter projetado ferramentais de baixa, média e alta complexidade, então o desempenho deles quanto ao sub-critério “Complexidade dos ferramentais já projetados” foi de 0,105 e 1,000 respectivamente. Após calcular os valores de desempenho de todos os fornecedores para cada sub-critério subjetivo, eles foram normalizados para somar a unidade. Este procedimento

resultou em consistência entre os sub-critérios objetivos e subjetivos no cálculo do escore total de desempenho dos fornecedores.

## 2.5. ESCORE FINAL DO FORNECEDOR

O escore final do fornecedor é calculado pela expressão:

$$E_k = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{n_i} W_i U_{ij} D_{ijk} \quad (2)$$

onde:

$E_k$  é o escore final do k-ésimo fornecedor,

$W_i$  é o peso do i-ésimo critério,

$U_{ij}$  é o peso do j-ésimo sub-critério associado ao i-ésimo critério,

$D_{ijk}$  é o *rating* de desempenho do k-ésimo fornecedor associado ao i-ésimo critério e ao j-ésimo sub-critério,

$n_i$  é o número total de sub-critérios associados ao i-ésimo critério.

O fornecedor com o maior escore final foi considerado o mais adequado.

### 3. METODOLOGIA

Como descrito na seção 1.3, a empresa escolhida para este estudo de caso firmou contrato com uma fábrica de transmissões para fornecimento de um novo modelo de carcaça de transmissão, ilustrada na Figura 13.

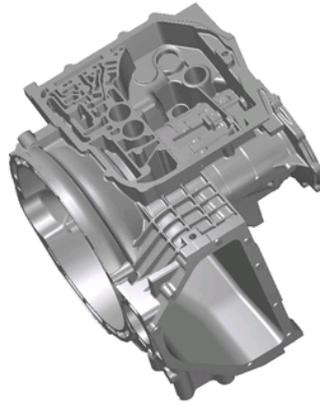


Figura 13 - Exemplo típico de uma Carcaça de Transmissão fundida sob pressão

O fluxograma a seguir mostra em detalhes o passo a passo da seleção de fornecedores pelo método proposto desde a visita aos fornecedores até a escolha da melhor alternativa.

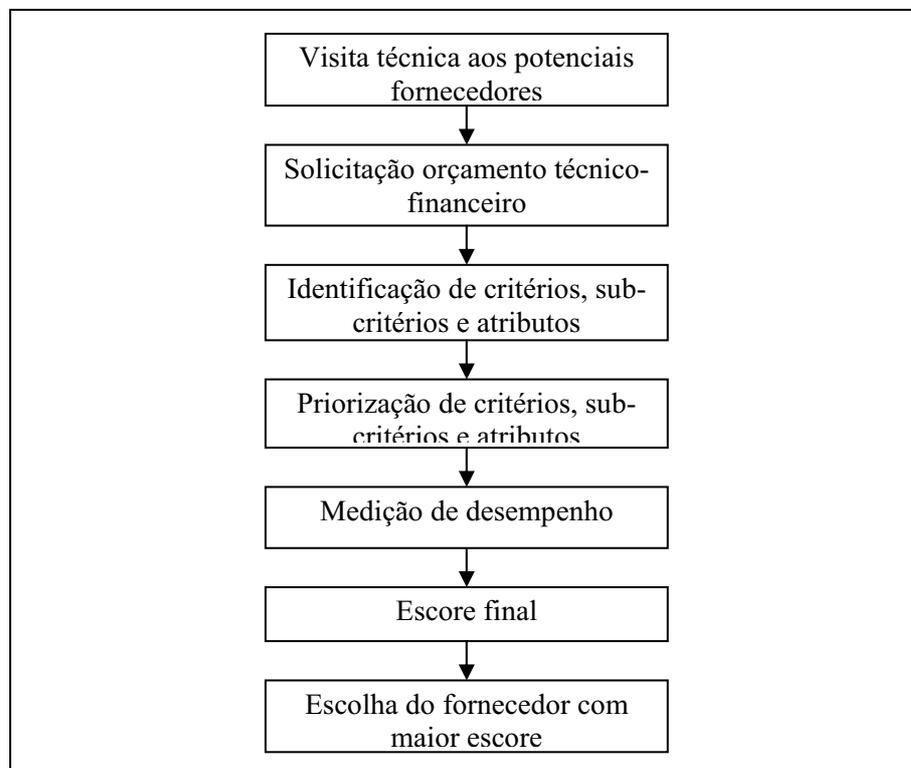


Figura 14 – Fluxograma do método de seleção de fornecedores

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. IDENTIFICAÇÃO DOS CRITÉRIOS, SUB-CRITÉRIOS E ATRIBUTOS

Neste estudo, cinco critérios e doze sub-critérios, definidos com base na revisão da literatura técnica (ANDRESEN, 2005; HERMAN, 1992; BAR-MEHIR, 2009), discussão com especialistas da empresa matriz na Alemanha e da própria fundição onde o estudo foi realizado, foram escolhidos para a seleção do fornecedor, objetivo da decisão a ser tomada. Três destes critérios (Projeto, Manufatura e Qualidade) são de natureza subjetiva e são apresentados no Quadro 4 com seus respectivos sub-critérios (as abreviaturas apresentadas entre parênteses nos quadros serão usadas posteriormente para facilitar a identificação dos critérios, sub-critérios e atributos nas matrizes de comparação). A seguir, para cada sub-critério foram definidos os atributos que estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 4 - Critérios e sub-critérios subjetivos de avaliação para os fornecedores de molde

| Objetivo da decisão              | Critérios        | Sub-critérios                                       |
|----------------------------------|------------------|---|
| Seleção do fornecedor            | Projeto (PRJ)    | Complexidade dos moldes já projetados (CFP)         |
|                                  |                  | CAD/CAM/CAE (SOF)                                   |
|                                  | Manufatura (MAN) | Tratamento Térmico (TTO)                            |
|                                  |                  | Usinagem, Eletroerosão, Acabamento e Montagem (UAM) |
|                                  | Qualidade (QLD)  | Sistema da Qualidade (SQL)                          |
|                                  |                  | Qualidade Dimensional (QDI)                         |
| Set-up e Amostras Iniciais (SAI) |                  |   |

A estrutura de hierarquização foi estabelecida em três níveis. No nível mais alto foi posicionado o objetivo de decisão (ou seja, a seleção do fornecedor), no nível seguinte figuram os cinco critérios e no nível mais baixo estão os doze sub-critérios divididos em grupos associados aos critérios correspondentes.

Os atributos “complexidade dos moldes já projetados” e os softwares “CAD/CAM/CAE” foram escolhidos para avaliar o critério de projeto. A complexidade no projeto deve-se principalmente a geometria do produto, ao número de componentes existentes no molde, as definições relativas aos sistemas de alimentação, de resfriamento e extração do fundido, ângulos de saída, expectativa de contração do produto, especificação das dimensões

que afetem a robustez e a segurança do molde, adição de estoque de material para a usinagem e a seleção dos materiais apropriados para que o molde alcance a vida útil projetada.

Quadro 5 - Sub-critérios subjetivos de avaliação e respectivos atributos

| Sub-critérios                                       | Atributos  |
|---|--|
| Complexidade dos moldes já projetados (CFP)         | a) Baixa (CFP1)<br>b) Média (CFP2)<br>c) Alta (CFP3)   |
| CAD/CAM/CAE (SOF)                                   | a) CAD sólido (SOF1)<br>b) CAD superfície (SOF2)<br>c) CAM caminho de usinagem (SOF3)<br>d) Projeto/Medição Integrados (SOF4)<br>e) Simulação de fluxo e solidificação (SOF5)                              |
| Tratamento Térmico (TTO)                            | a) Forno Convencional (TTO1)<br>b) Forno a vácuo, alta velocidade de resfriamento (TTO2)   |
| Usinagem, Acabamento, Eletroerosão e Montagem (UAM) | a) Fresadoras Verticais com CNC para Desbaste (UAM1)<br>b) Centros Usinagem, 3/5 eixos, HS, com CNC (UAM2)<br>c) Eletroerosão (UAM3)<br>d) Prensa de fechamento (UAM4)<br>e) Acabamento superficial (UAM5) |
| Sistema da Qualidade (SQL)                          | a) Autocertificado (SQL1)<br>b) Certificado ISO 9000 (SQL2)<br>c) Certificado ISO TS 16949 ou similar (SQL3)   |
| Qualidade Dimensional (QDI)                         | a) Instrumentos Manuais de Medição (QDI1)<br>b) Máquina de Medir por Coordenadas (QDI2)<br>c) Braço portátil de medição (QDI3)   |
| Set-up e Amostras Iniciais (SAI)                    | a) Dimensional do fundido (SAI1)<br>b) Aparência e sanidade do fundido (SAI2)<br>c) Set-up do molde (SAI3)   |

A disponibilidade dos softwares específicos torna possível modelar o molde a partir do produto, desenvolver os programas de caminhos de ferramenta que podem ser simulados virtualmente e otimizados para reduzir o tempo de manufatura, transferir os programas de

usinagem para a máquina de medir por coordenadas e usá-los no controle dimensional do molde, simular o fluxo e a solidificação do fundido no molde para prever e eliminar problemas associados a baixa produtividade e qualidade.

Os sub-critérios “tratamento térmico” e “usinagem, acabamento e montagem” foram escolhidos para avaliar a capacidade dos fornecedores quanto à manufatura do molde. O tratamento térmico é tão importante para o molde quanto o aço utilizado em sua fabricação. No processo de fundição sob pressão o molde está sujeito a considerável gradiente térmico. Se durante a fase de solidificação do fundido, o molde é aquecido pelo contato com o metal líquido, no momento seguinte ao da abertura para ejeção da peça ela é rapidamente resfriada pela limpeza de sua superfície com jato de água e aplicação do agente desmoldante. Esta variação resulta em fadiga térmica dando origem ao surgimento de microtrincas superficiais que, por sua vez, reduzem a vida útil do molde. O ciclo apropriado de tratamento térmico, feito em equipamento adequado e sob os devidos controles, é fundamental para conferir a resistência mecânica e térmica necessárias ao bom desempenho do molde.

O sub-critério “usinagem, acabamento e montagem” é de prima importância no processo de fabricação. Buscou-se avaliar se o fornecedor dispunha de máquinas operatrizes bem mantidas e capazes de realizar as operações de desbaste e de acabamento com precisão e em tempo razoável. Foram observados ainda os recursos do fornecedor para transportar internamente o molde ou seus componentes de maior peso. O processo de eletroerosão foi incluído entre os sub-critérios por ser considerado uma alternativa quando complexidades geométricas de determinadas partes do molde representem um obstáculo à usinagem convencional. A prensa de fechamento é importante para avaliar se a folga entre os dois semi-moldes, com o molde fechado sob as cargas mecânicas da injetora, atende o valor de projeto. A superfície do molde deve ser lixada e polida para a eliminação de riscos e contra-saídas que possam provocar a aderência de metal líquido nesta região durante a injeção.

Os sub-critérios para avaliação da qualidade são “sistema de qualidade”, “qualidade dimensional” e “*set-up* e amostras iniciais”. A certificação do sistema de qualidade do fornecedor, em especial se realizada por uma entidade competente e independente, foi incluída por ser um indicativo de visão de processo, consistência na manufatura e foco na satisfação dos clientes. Para garantir que as especificações dimensionais do molde estão sendo atendidas, o fornecedor precisa dispor de equipamentos de medição calibrados, confiáveis e operados em ambientes próprios e por técnicos qualificados. O “braço portátil de medição”

foi acrescentado entre os sub-critérios por sua versatilidade e portabilidade, já que em determinadas ocasiões torna-se difícil manusear o molde, ou seus componentes mais pesados, sobre a máquina de medir por coordenadas.

Espera-se que ao final da fabricação do molde o fornecedor tenha os recursos disponíveis para produzir as primeiras amostras em suas instalações. Nesta produção piloto se avaliam as possibilidades de otimização do tempo de *set-up* do molde na injetora, se inspecionam dimensionalmente as peças produzidas verificando-se sua adequação ao projeto. Elas também devem ser inspecionadas, visualmente e por fluoroscopia, quanto a possíveis defeitos metalúrgicos relacionados ao molde que, se existentes, precisarão ser eliminados antes do uso do mesmo em produção. Para cada critério subjetivo foram definidos determinados atributos. Na maioria das vezes, a preferência por um ou outro destes atributos é relativamente clara, entretanto nem sempre é fácil exprimir a magnitude destas preferências. Por exemplo, no sub-critério “Tratamento Térmico”, embora o atributo “forno a vácuo com alta velocidade de resfriamento” possa ser o preferido, deseja-se quantificar sua importância relativa em relação ao atributo “forno convencional”.

Os dois critérios adicionais são quantitativos ou objetivos (Prazo e Preço) e estão apresentados no Quadro 6 com seus respectivos sub-critérios.

Quadro 6 - Critérios e sub-critérios objetivos de avaliação

| Objetivo da decisão   | Critérios   | Sub-Critérios                           |
|-----------------------|-------------|---|
| Seleção do Fornecedor | Prazo (PRZ) | Prazo de conclusão do projeto (COP)     |
|                       |             | Prazo de entrega e teste do molde (ETF) |
|                       |             | Prazo de aprovação final do molde (AFF) |
|                       | Preço (PRO) | Preço do projeto (PPJ)                  |
| Preço do molde (PFE)  |             |   |

O critério prazo foi avaliado por três diferentes perspectivas: prazo de conclusão do projeto, prazo para a entrega e teste do molde e prazo de aprovação do molde. A conclusão do projeto é uma das etapas mais importantes na construção do molde. Normalmente é durante o projeto que a fundição e seu fornecedor discutem os conceitos de construção, abordam dificuldades experimentadas em moldes anteriores e buscam soluções para evitar que problemas antigos voltem a ocorrer (NADCA, 2009). Mediante os testes práticos com o molde já será possível projetar o comportamento do molde em produção. É logo após estes

testes que se fazem os ajustes necessários no molde de modo a deixá-lo apto para a produção em massa. No pedido formal de orçamento a empresa onde este estudo de caso foi realizado informou aos fornecedores potenciais os prazos limites para cada uma destas três fases, todos eles dentro do padrão da indústria para este tipo de construção.

O fator preço foi subdividido em dois sub-critérios, preço do projeto e do molde. Como a empresa contratante ainda mantém os recursos necessários para projetar um molde deste porte ela tinha interesse em comparar seu custo para isto com o preço ofertado pelos fornecedores. O preço final inclui as despesas para a amostragem, considera o molde posto na fundição e está associado ao escopo detalhado de construção e a forma de pagamento. Embora os profissionais consultados considerem ter incluído a maioria dos critérios e sub-critérios importantes neste estudo, é possível que, se uma investigação similar fosse realizada em outras organizações deste segmento, dela resultariam fatores diferentes. Esta possibilidade pode ser explicada pelo fato de ser o problema de seleção do fornecedor específico a cada aplicação, além da influência que a cultura técnica e a orientação estratégica gerencial de cada empresa exercem sobre ele.

#### 4.2. PRIORIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS, SUB-CRITÉRIOS E ATRIBUTOS

Neste estudo de caso, as comparações pareadas usadas no preenchimento das matrizes foram realizadas por uma equipe coordenada pelo gerente do projeto e formada por um engenheiro de qualidade, um supervisor de produção e um engenheiro de processos. Seguindo recomendação encontrada em Saaty (1990), foi considerado que a razão de consistência de qualquer uma das matrizes de comparação não poderia ser superior a 0,10. Quando isto eventualmente ocorreu, a equipe responsável pelas comparações rediscutiu e revisou o valor original das intensidades atribuídas para eliminar a incoerência.

O resultado da comparação entre os critérios é apresentado na Tabela 3 e das comparações para os sub-critérios nas Tabelas 4 a 8.

Tabela 3 - Matriz de Comparação para os critérios

|     | PRJ | MAN | QLD | PRZ | PRO                    | Pesos |
|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------|-------|
| PRJ | 1   | 4   | 3   | 7   | 5                      | 0,463 |
| MAN | ¼   | 1   | 1/3 | 5   | 3                      | 0,145 |
| QLD | 1/3 | 3   | 1   | 7   | 5                      | 0,282 |
| PRZ | 1/7 | 1/5 | 1/7 | 1   | 1/3                    | 0,037 |
| PRO | 1/5 | 1/3 | 1/5 | 3   | 1                      | 0,073 |
|     |     |     |     |     | Razão de Consistência= | 0,067 |

Como indicado na Tabela 3, os critérios Projeto, Qualidade e Manufatura receberam as maiores prioridades. Dentre estes fatores, os sub-critérios mais importantes, foram respectivamente a disponibilidade de softwares (CAD/CAM/CAE) (veja Tabela 4), a capacidade para produção e avaliação de amostras iniciais (veja Tabela 5) e recursos para usinagem, montagem e acabamento do molde (veja Tabela 6).

O critério preço teve baixa prioridade, confirmando o entender da equipe de avaliação que a vantagem existente por um desembolso inicial menor é rapidamente perdida se durante a produção em massa dos fundidos o molde causar problemas de baixa qualidade e produtividade.

Como se sabia de antemão que a integração deste novo molde poderia ser feita em um prazo confortável, este critério recebeu a menor prioridade.

Tabela 4 - Matriz de Comparação para os sub-critérios de projeto

|     | CFP | SOF                    | Pesos |
|-----|-----|------------------------|-------|
| CFP | 1   | 1/7                    | 0,125 |
| SOF | 7   | 1                      | 0,875 |
|     |     | Razão de Consistência= | 0,000 |

Tabela 5 - Matriz de Comparação para os sub-critérios de qualidade

|     | SQL | QDI | SAI                    | Pesos |
|-----|-----|-----|------------------------|-------|
| SQL | 1   | 1/3 | 1/5                    | 0,105 |
| QDI | 3   | 1   | 1/3                    | 0,258 |
| SAI | 5   | 3   | 1                      | 0,637 |
|     |     |     | Razão de Consistência= | 0,033 |

Tabela 6 - Matriz de Comparação para os sub-critérios de manufatura

|                        | TTO | UAM | Pesos |
|------------------------|-----|-----|-------|
| TTO                    | 1   | 1/7 | 0,125 |
| UAM                    | 7   | 1   | 0,875 |
| Razão de Consistência= |     |     | 0,000 |

Tabela 7 - Matriz de Comparação para os sub-critérios de preço

|                        | PPJ | PFE | Pesos |
|------------------------|-----|-----|-------|
| PPJ                    | 1   | 1/7 | 0,125 |
| PFE                    | 7   | 1   | 0,875 |
| Razão de Consistência= |     |     | 0,000 |

Tabela 8 - Matriz de Comparação para os sub-critérios de prazo

|                        | COP | ETF | AFF | Pesos |
|------------------------|-----|-----|-----|-------|
| COP                    | 1   | 1/3 | 1/5 | 0,105 |
| ETF                    | 3   | 1   | 1/3 | 0,258 |
| AFF                    | 5   | 3   | 1   | 0,637 |
| Razão de Consistência= |     |     |     | 0,033 |

As matrizes de comparação dos atributos de cada sub-critério são apresentadas nas Tabelas 9 a 15.

Tabela 9 - Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério complexidade dos moldes

|                        | CFP1 | CFP2 | CFP3 | Pesos |
|------------------------|------|------|------|-------|
| CFP1                   | 1    | 1/3  | 1/5  | 0,105 |
| CFP2                   | 3    | 1    | 1/3  | 0,258 |
| CFP3                   | 5    | 3    | 1    | 0,637 |
| Razão de Consistência= |      |      |      | 0,033 |

Tabela 10 - Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério CAD/CAM/CAE

|                        | SOF1 | SOF2 | SOF3 | SOF4 | SOF5 | Pesos |
|------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| SOF1                   | 1    | 1/3  | 3    | 5    | 6    | 0,267 |
| SOF2                   | 3    | 1    | 5    | 6    | 7    | 0,491 |
| SOF3                   | 1/3  | 1/5  | 1    | 3    | 5    | 0,135 |
| SOF4                   | 1/5  | 1/6  | 1/3  | 1    | 3    | 0,069 |
| SOF5                   | 1/6  | 1/7  | 1/5  | 1/3  | 1    | 0,037 |
| Razão de Consistência= |      |      |      |      |      | 0,071 |

Tabela 11 - Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério tratamento térmico

|                        | TTO1 | TTO2 | Pesos |
|------------------------|------|------|-------|
| TTO1                   | 1    | 1/5  | 0,167 |
| TTO2                   | 5    | 1    | 0,833 |
| Razão de Consistência= |      |      | 0,000 |

Tabela 12 - Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério “Usinagem, Acabamento e Montagem”

|                        | UAM1 | UAM2 | UAM3 | UAM4 | UAM5 | Pesos |
|------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| UAM1                   | 1    | 1/2  | 7    | 3    | 5    | 0,314 |
| UAM2                   | 2    | 1    | 7    | 3    | 5    | 0,415 |
| UAM3                   | 1/7  | 1/7  | 1    | 1/5  | 1/3  | 0,038 |
| UAM4                   | 1/3  | 1/3  | 5    | 1    | 3    | 0,158 |
| UAM5                   | 1/5  | 1/5  | 3    | 1/3  | 1    | 0,075 |
| Razão de Consistência= |      |      |      |      |      | 0,084 |

Tabela 13 - Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério “Sistema da Qualidade”

|                        | SQL1 | SQL2 | SQL3 | Pesos |
|------------------------|------|------|------|-------|
| SQL1                   | 1    | ¼    | 1/5  | 0,094 |
| SQL2                   | 4    | 1    | 1/3  | 0,280 |
| SQL3                   | 5    | 3    | 1    | 0,627 |
| Razão de Consistência= |      |      |      | 0,074 |

Tabela 14 - Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério “Qualidade Dimensional”

|      | QDI1 | QDI2 | QDI3                   | Pesos |
|------|------|------|------------------------|-------|
| QDI1 | 1    | 1/3  | 3                      | 0,268 |
| QDI2 | 3    | 1    | 4                      | 0,615 |
| QDI3 | 1/3  | 1/4  | 1                      | 0,117 |
|      |      |      | Razão de Consistência= | 0,063 |

Tabela 15 - Matriz de Comparação dos atributos do sub-critério “Set-up e Amostras Iniciais”

|      | SAI1 | SAI2 | SAI3                   | Pesos |
|------|------|------|------------------------|-------|
| SAI1 | 1    | 3    | 6                      | 0,652 |
| SAI2 | 1/4  | 1    | 5                      | 0,268 |
| SAI3 | 1/6  | 1/5  | 1                      | 0,080 |
|      |      |      | Razão de Consistência= | 0,028 |

Sob aspecto dos atributos de sub-critérios pode-se destacar que os mais relevantes são:

- (a) Projetos de moldes com alto nível de complexidade (veja Tabela 9),
- (b) Disponibilidade de CAD de superfície (veja Tabela 10),
- (c) Disponibilidade de forno a vácuo com alta velocidade de resfriamento para o tratamento térmico (veja Tabela 11),
- (d) Disponibilidade de centros de usinagem CNC, com alta velocidade, de três e cinco eixos (veja Tabela 12)
- (e) Certificação ISO/TS 16949 ou similar (veja Tabela 13),
- (f) Disponibilidade de máquina de medir por coordenadas (veja Tabela 14),
- (g) Realização da inspeção dimensional das primeiras amostras fundidas (veja Tabela 15).

A Tabela 16 apresenta o desempenho dos fornecedores (F1), (F2) e (F3) segundo critérios e sub-critérios estabelecidos. Como proposto na seção 2.4 (medição de desempenho),

os critérios subjetivos foram avaliados segundo o método dos *ratings* e os critérios objetivos segundo o método da normalização.

Tabela 16 – Desempenho normalizado dos fornecedores

| Critério   | Sub-critério                                  | FORNECEDORES |       |       |
|------------|---|--------------|-------|-------|
|            |   | F1           | F2    | F3    |
| Projeto    | Complexidade                                  | 0,363        | 1,000 | 0,363 |
|            | CAD/CAM/CAE                                   | 0,963        | 0,963 | 0,664 |
| Manufatura | Tratamento Térmico                            | 0,833        | 0,833 | 0,167 |
|            | Usinagem, Eletroerosão, Acabamento e Montagem | 0,427        | 0,611 | 0,490 |
| Qualidade  | Sistema de qualidade                          | 0,094        | 0,280 | 0,906 |
|            | Qualidade dimensional                         | 1,000        | 0,883 | 0,883 |
|            | <i>Set-up</i> e amostras iniciais             | 0,652        | 0,732 | 0,732 |
| Prazo      | Conclusão do projeto                          | 0,286        | 0,429 | 0,286 |
|            | Entrega e Teste do Molde                      | 0,294        | 0,441 | 0,265 |
|            | Aprovação Final do Molde                      | 0,324        | 0,405 | 0,270 |
| Preço      | Preço do Projeto                              | 0,387        | 0,290 | 0,323 |
|            | Preço do Molde                                | 0,392        | 0,294 | 0,314 |

Na estrutura elaborada para este estudo, o critério projeto (subjetivo) subdivide-se em complexidade e sistemas de projeto (CAD/CAM/CAE). O subcritério complexidade é subdividido em três atributos: baixa, média e alta.

Segundo a avaliação dos especialistas o fornecedor (F1) e o fornecedor (F3) comprovaram experiência em projetos com baixa e média complexidade, cujos pesos são respectivamente 0,105 e 0,258 (veja Tabela 9), acumulando um *rating* total de 0,363. O fornecedor (F2) demonstrou experiência em projetos de baixa, média e alta complexidade, portanto pelo mesmo raciocínio anterior obteve o *rating* igual a unidade. Os demais *ratings* para os subcritérios subjetivos da Tabela 16 foram obtidos por analogia.

Para a obtenção dos desempenhos nos subcritérios objetivos foi utilizado o método da normalização, exemplificado a seguir para o sub-critério prazo de conclusão do projeto. Nos dados fornecidos para orçamento, os fornecedores (F1), (F2) e (F3) apresentaram respectivamente os prazos 3, 2 e 3 meses. Segundo o método da normalização estes prazos passaram a ser representados como 0,333; 0,500 e 0,333. O passo seguinte é somar os dados

anteriores e o resultado é 1,166. O último passo é efetuar a divisão de cada prazo normalizado pelo somatório das normalizações e o desempenho do sub-critério conclusão do projeto é respectivamente 0,286; 0,429 e 0,286.

A Tabela 17 apresenta o resultado de todos os fornecedores em cada critério e sub-critério e conseqüentemente os escores globais, obtidos através da expressão (2), que se encontra na seção 2.5.

Tabela 17 - Escore final dos fornecedores

| CRITÉRIO   | SUB-CRITÉRIO                                     | FORNECEDORES E ESCORES |        |        |
|------------|--|------------------------|--------|--------|
|            |  | F1                     | F2     | F3     |
| Projeto    | Complexidade                                     | 0,021                  | 0,058  | 0,021  |
|            | CAD/CAM/CAE                                      | 0,390                  | 0,390  | 0,269  |
|            |  | 0,411                  | 0,448  | 0,290  |
|            | <b>Sub-total</b>                                 | (0,36)                 | (0,39) | (0,25) |
| Manufatura | Tratamento Térmico                               | 0,015                  | 0,015  | 0,003  |
|            | Usinagem, Eletroerosão,<br>Acabamento e Montagem | 0,054                  | 0,078  | 0,062  |
|            |  | 0,069                  | 0,093  | 0,065  |
|            | <b>Sub-total</b>                                 | (0,31)                 | (0,41) | (0,28) |
| Qualidade  | Sistema de qualidade                             | 0,003                  | 0,008  | 0,027  |
|            | Qualidade dimensional                            | 0,073                  | 0,064  | 0,064  |
|            | Set-up e amostras iniciais                       | 0,117                  | 0,131  | 0,131  |
|            |  | 0,193                  | 0,203  | 0,222  |
|            | <b>Sub-total</b>                                 | (0,31)                 | (0,33) | (0,36) |
| Prazo      | Conclusão do projeto                             | 0,001                  | 0,002  | 0,001  |
|            | Entrega e Teste do Molde                         | 0,003                  | 0,004  | 0,003  |
|            | Aprovação Final do Molde                         | 0,008                  | 0,010  | 0,006  |
|            |  | 0,012                  | 0,016  | 0,010  |
|            | <b>Sub-total</b>                                 | (0,32)                 | (0,42) | (0,26) |
| Preço      | Preço do Projeto                                 | 0,004                  | 0,003  | 0,003  |
|            | Preço do Molde                                   | 0,025                  | 0,019  | 0,020  |
|            |  | 0,029                  | 0,022  | 0,023  |
|            | <b>sub-total</b>                                 | (0,39)                 | (0,30) | (0,31) |
|            |  | 0,713                  | 0,782  | 0,611  |
|            | <b>ESCORE TOTAL</b>                              | (0,34)                 | (0,37) | (0,29) |

(nota: números entre parênteses são valores relativos)

O fornecedor F2 recebeu o maior escore final (37%), seguido dos fornecedores F1 (34%) e F3 (29%). O fornecedor F2 teve maior desempenho nos critérios de projeto, manufatura e prazo. O fornecedor F1 teve o melhor desempenho em preço, entretanto seus escores nos demais critérios foram insuficientes. O fornecedor F3 obteve o melhor escore no critério qualidade, pouco superior ao do fornecedor F2, mas seu desempenho foi inferior em todos os demais fatores.

#### 4.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

As prioridades encontradas para os critérios, resultantes dos pesos arbitrados nas comparações pareadas, foram determinantes na composição dos escores que indicaram o fornecedor (F2) como a melhor opção. Desde que estes pesos estão baseados em um julgamento subjetivo, é conveniente que a estabilidade dos escores frente a variações destes ponderadores seja testada, conduzindo-se para tal uma análise de sensibilidade baseada em cenários que reflitam visões diferentes sobre a importância relativa dos critérios.

Neste exercício, procura-se aumentar ou reduzir o peso de critérios individuais e verificar as mudanças resultantes nas prioridades e na formação dos escores que, em última instância, são responsáveis pela realização do objetivo maior, isto é, a seleção do fornecedor.

A análise de sensibilidade é a ferramenta usada para testar a estabilidade dos escores (CHANG et al., 2007). Bayazit (2005) pondera que o processo de seleção deve ser cuidadosamente revisado se os escores obtidos na seleção dos fornecedores mostrarem-se altamente sensíveis a pequenas mudanças nos pesos dos critérios. No presente estudo, envolvendo a seleção de um fornecedor para um molde de fundição, esta diretiva foi verificada e se constatou que mudanças de pequena magnitude ( $\pm 5\%$ ) nas prioridades dos critérios não alteram o resultado final encontrado.

Prosseguindo-se com a análise de sensibilidade, cada um dos critérios foi significativamente alterado verificando-se o efeito na seleção do fornecedor. Respeitados os limites técnicos e econômicos de coerência em cada cenário investigado, os pesos dos critérios complementares foram apropriadamente revisados para que a soma de todos eles fosse igual a unidade e se mantivesse a consistência da matriz resultante.

As matrizes de comparação resultantes são apresentadas no Apêndice A (Tabelas A1 – A4) e os respectivos resultados estão sumarizados na Tabela 18 onde as prioridades originais dos critérios são comparadas com as prioridades resultantes de quatro diferentes cenários, isto é, maior ênfase à Manufatura (Cenário A), à Qualidade (cenário B), ao Prazo (Cenário C) e finalmente ao Preço (Cenário D).

Como já foi mencionado anteriormente, em todos os casos se preservou a consistência da matriz (evidenciado por  $CR < 10\%$  em cada cenário). Finalmente se reporta nas últimas linhas desta Tabela o escore total de cada fornecedor em cada cenário, valores que permitem concluir que o fornecedor (F2) apresenta-se como a melhor opção em uma gama bastante ampla de prioridades.

Tabela 18 – Cenários submetidos à Análise de Sensibilidade

| Critérios                    | Estudo Original             | Prioridades dos Critérios |              |              |              |
|------------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                              |                             | Cenário A                 | Cenário B    | Cenário C    | Cenário D    |
| Projeto                      | <b>0,463</b>                | 0,250                     | 0,290        | 0,274        | 0,309        |
| Manufatura                   | 0,145                       | <b>0,490</b>              | 0,185        | 0,076        | 0,099        |
| Qualidade                    | 0,282                       | 0,171                     | <b>0,390</b> | 0,134        | 0,174        |
| Prazo                        | 0,037                       | 0,031                     | 0,046        | <b>0,477</b> | 0,033        |
| Preço                        | 0,073                       | 0,058                     | 0,089        | 0,039        | <b>0,385</b> |
| <b>Razão de Consistência</b> | 0,067                       | 0,091                     | 0,041        | 0,063        | 0,077        |
| Fornecedor                   | Escore Total por Fornecedor |                           |              |              |              |
| F1                           | 0,713                       | 0,605                     | 0,662        | 0,535        | 0,602        |
| F2                           | <b>0,782</b>                | <b>0,709</b>              | <b>0,726</b> | <b>0,621</b> | <b>0,615</b> |
| F3                           | 0,611                       | 0,539                     | 0,613        | 0,453        | 0,506        |

No estudo original os critérios prioritários em ordem decrescente são Projeto, Qualidade, Manufatura, Preço e Prazo. O fornecedor (F2) tem desempenho superior ao Fornecedor (F1) em todos eles, exceto em Preço. O fornecedor (F2) tem ainda desempenho superior ao fornecedor (F3) em Projeto, Manufatura e Prazo, desempenho inferior em Qualidade e desempenho praticamente igual em Preço. A Tabela 19, construída apenas com finalidade exploratória, indica um conjunto de prioridades sobre o qual o fornecedor (F1) e o fornecedor (F3) tornar-se-iam preferidos ao fornecedor (F2). As matrizes de priorização correspondentes são apresentadas no Apêndice A (Tabelas A5 e A6).

Tabela 19 – Análise Exploratória pró Fornecedores (F1) e (F3)

| <b>Crítérios</b>             | <b>Prioridades dos Crítérios</b>   |                  |                  |
|------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------|
|                              | Estudo Original                    | Cenário pró (F1) | Cenário pró (F3) |
| Projeto                      | <b>0,463</b>                       | 0,046            | 0,068            |
| Manufatura                   | 0,145                              | 0,076            | 0,042            |
| Qualidade                    | 0,282                              | 0,104            | <b>0,622</b>     |
| Prazo                        | 0,037                              | 0,192            | 0,064            |
| Preço                        | 0,073                              | <b>0,581</b>     | 0,203            |
| <b>Razão de Consistência</b> | 0,067                              | 0,098            | 0,089            |
| <b>Fornecedor</b>            | <b>Escore Total por Fornecedor</b> |                  |                  |
| F1                           | 0,713                              | <b>0,436</b>     | 0,605            |
| F2                           | <b>0,782</b>                       | 0,419            | 0,629            |
| F3                           | 0,611                              | 0,380            | <b>0,634</b>     |

## 5. CONCLUSÃO

O processo de decisão quando há muitos critérios a levar em conta é difícil e de resultado duvidoso quando não realizado de modo estruturado. Opções realizadas intuitivamente têm baixa qualidade, pois não levam em conta todos os fatores em jogo, nem consideram o peso de cada um deles.

Neste estudo o método AHP foi empregado para selecionar um fornecedor de molde de fundição, cujo projeto e construção são de extrema complexidade. Fatores qualitativos e quantitativos foram levados em conta no processo e a importância de cada um deles foi metodicamente ponderada. Em alguns casos, para se alcançar a consistência nos julgamentos, foi necessário revisar os escores atribuídos, o que implicou em ligeiro aumento no tempo de análise. Os resultados finais obtidos para a razão de consistência das matrizes apontaram, entretanto, suficiente coerência nas comparações, transmitindo aos participantes do processo de decisão a confiança na escolha do fornecedor de maior qualificação.

Por fim, acredita-se que este estudo é mais um caso de sucesso de aplicação do AHP e possibilita uma visualização detalhada da estruturação do problema até que o objetivo final seja atendido, isto é, a identificação do fornecedor com melhores características de atendimento as premissas estratégicas estabelecidas pela empresa estudada.

## **6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Este estudo buscou explorar de forma metodológica a aplicação do AHP para seleção de fornecedores. Como apresentado anteriormente o AHP tem como característica a possibilidade de combinação entre critérios quantitativos e qualitativos. Justamente por este último critério é que se percebe a oportunidade para desenvolvimento de futuros trabalhos.

Dependendo da estratégia da empresa a priorização pode ser completamente alterada e desta forma o resultado da seleção de fornecedores no caso apresentado seria completamente diferente. Se o grupo especialista fosse orientado a outra estratégia a priorização seria outra e outros fornecedores poderiam ser definidos.

É importante ressaltar que não existem critérios certos ou errados para aplicação deste método. Cada tipo de mercado demanda uma necessidade específica às empresas que a ele pertencem, por exemplo, para definir sua representatividade a empresa pode pautar sua atuação por fatores como rentabilidade, clima organizacional, fatia de participação, etc.

Uma variação deste estudo seria a definição de outros critérios baseada no que foi comentado no parágrafo anterior. Muitas possibilidades de modificação podem ser verificadas na aplicação deste método. A questão central está em definir claramente qual é o objetivo principal do estudo.

Outra alternativa é a utilização da rede global para aplicação do método acima proposto. Está é uma possibilidade muito válida uma vez que a integração de sistemas é cada vez mais utilizada no mercado de forma geral.

## REFERÊNCIAS

- AKARTE, M. M.; SURENDRA, N. V.; RAVI, B.; RANGARAJ, N.; Web based casting supplier evaluation using analytical hierarchy process, **Journal of the Operational Research Society**, v. 52, p. 511-522, 2001.
- ANDRESEN, B., **Die Casting Engineering: A Hydraulic, Thermal and Mechanical Process**, Marcel Decker, New York, United States of America, 2005, 384 p.
- ABAL (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO), 2010, disponível em <<http://www.abal.org.br>>, acesso em 31. Maio. 2010.
- ANFAVEA (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES), carta da ANFAVEA no. 284, disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/carta.html>>, acesso em 11. Janeiro. 2010.
- BAR-MEIR, G., **Fundamentals of Die Casting Design**, 2009, 263 p., disponível em: <<http://www.potto.org/DC/dieCasting.pdf>>, acesso em 08. Abril. 2009.
- BAYAZIT, O.; Use of AHP in decision-making for flexible manufacturing systems, **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 16, n. 7, p. 808-819, 2005.
- CHAN, F. T. S.; CHAN, H. K.; Development of the supplier selection model - a case study in the advanced technology industry, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Engineering Manufacture**, v. 218, p. 1807-1824, 2004.
- CHANG, C.-W.; WU, C.-R.; LIN, C.-T.; CHEN, H.-C., An application of AHP and sensitivity analysis for selecting the best slicing machine, **Computers and Industrial Engineering**, v. 52, p. 296-307, 2007.
- CHOI, T. Y.; HARTLEY, J. L., An exploration of supplier selection practices across the supply chain, **Journal of Operations Management**, v. 14, p. 333-43, 1996.
- COX, A.; IRELAND, P.; LONSDALE, C.; SANDERSON, J.; WATSON, G., **Supply Chain Management: A guide to best practice**, Pearson Education Limited, London, United Kindom, 2003, 120 p.
- COYLE, G., **Practical Strategy: Structured tools and techniques**, Prentice Hall, Harlow, UK, 2004, 336 p.
- DE BOER, L.; LABRO, E.; MORLACCHI, P., A review of methods supporting supplier selection, **European Journal of Purchasing & Supply Management**, v. 7, p. 75-89, 2001.
- EAA (EUROPEAN ALUMINUM ASSOCIATION), 2008, "Aluminum in Cars", disponível em: <<http://www.eaa.net>>, acesso em 11. Janeiro. 2010.
- GOFFIN, K.; SZWEJCZEWSKI, M.; NEW, C., Managing suppliers: when fewer can mean more, **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 27, n. 7, p. 422-436, 1997.

HEIZER, J.; RENDER, B.; **Operations Management**, 8th ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2005, 784 p.

HERMAN, E.A., **Designing die casting dies**, North American Die Casting Association, Rosemont, Illinois, United States of America, 1992, 326 p.

HO, W.; XU, X.; DEY, P. K.; Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review, **European Journal of Operational Research**, v. 202, p. 16–24, 2010.

HOU, J.; SU, D.; EJB-MVC oriented supplier selection system for mass customization, **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 18, n. 1, p. 54-71, 2007.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R., **Manufacturing Engineering and Technology**, Prentice Hall, 6<sup>th</sup> edition, 2009, 1200 p.

KLOBCAR, D.; TUSEK, J.; TALJAT, B., Thermal fatigue of materials for die-casting tooling, **Materials Science and Engineering A**, v. 472, p. 198-207, 2008.

KOSEC, B., Failures of dies for die-casting of aluminum alloys, **Metalurgija**, v. 47, n. 1, p. 51-55, 2008.

MAGUIRE, M.; HAGEN, M.; Explosion of New Products Creates Challenges, **Quality Progress**, p. 29-36, May 1999.

MUHI, M.; TUEK, J.; KOSEL, F.; KLOBAR, D.; PLETESKI, M., Thermal fatigue cracking of die-casting dies, **Metalurgija**, 2010, vol. 49, n. 1, pp. 9-12.

MURALIDHARAN, C.; ANANTHARAMAN, N.; S.G. DESHMUKH, S. G.; A Multi-Criteria Group Decision- Making Model for Supplier Rating, **The Journal of Supply Chain Management**, p. 22-33, Fall 2002.

NADCA (NORTH AMERICA DIE CASTING ASSOCIATION), 2005, Shaping America's future, disponível em: <[www.diecasting.org](http://www.diecasting.org)>, acesso em 11. Janeiro. 2010.

NADCA (NORTH AMERICA DIE CASTING ASSOCIATION), 2009, "Checklist NADCA T-2-1-09 for die casting die specifications", p. 17-19, disponível em: <[www.diecasting.org](http://www.diecasting.org)>, acesso em 11. Janeiro. 2010.

PERINI, M.; IKONI; S. MARI, Die casting process assessment using single minute exchange of dies (SMED) method, **Metalurgija**, v. 48, n. 3, p. 199-202, 2009.

SAATY, T. L., **The analytic hierarchy process**, McGraw-Hill, New York, 1980, 725 p.

SAATY, T. L., How to make a decision: the analytic hierarchy process, **European Journal of Operational Research**, v. 48, p. 9-26, 1990.

SAATY, T. L., Highlights and critical points in the theory and application of the analytic hierarchy process, **European Journal of Operational Research**, v. 74, p. 426-447, 1994.

SALOMON V. A. P.; WHITAKER, R., Decision-making considering dependence relations for the improvement of production management, **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 4, n. 2, p. 47-60, 2007.

SARTORI, C. H.; ANDRADE, C. M., Processo OXY<sup>®</sup> - “Um novo tratamento superficial para ferramentas de fundição sob pressão de alumínio”, 59<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM Internacional, 2004.

SHEHATA, F.; ABD-ELHAMID, M., Computer aided foundry die-design; **Materials and Design**, v. 24, p. 577-583, 2003.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M., **Metodologia da Pesquisa e Elaboração da Dissertação**, Laboratório de Ensino a Distância da Universidade Federal de Santa Catarina, 3<sup>a</sup> edição, 2001, 121 p.

TRACEY, M.; TAN, C.L.; Empirical analysis of supplier selection and involvement, customer satisfaction, and firm performance, **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 6, n. 4, p. 174-88, 2001.

VAYDIA, O. S.; KUMAR, S.; Analytic hierarchy process: An overview of applications, **European Journal of Operational Research**, v. 169, p. 1–29, 2006.

VARGAS, L. G., An overview of the analytic hierarchy process and its applications, **European Journal of Operational Research**, v. 48, p. 2-8, 1990.

YUE, S.; WANG, G.; YIN, F.; WANG, X.; YANG, J., Application of an integrated CAD/CAE/CAM system for die casting dies, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 139, p.465-468, 2003.

YOSHIDA, S.; SARTORI, C. H.; ARRUDA, A. C., 2004, Recomendação para a seleção de aços, tratamento térmico e tratamento de superfície de ferramenta de injeção de alumínio, disponível em: <<http://www.brasimet.com.br>>, acesso em 31.05.2010.

WEBER, C. A.; CURRENT, J. R.; BENTON, W.C., Vendor selection criteria and methods, **European Journal of Operational Research**, v. 50, p. 2-18, 1991.

## APÊNDICE A – MATRIZES DE COMPARAÇÃO EM DIFERENTES CENÁRIOS

Tabela A1 – Cenário A (ênfase em manufatura)

|          | PRJ | MAN | QLD | PRZ | PRO | AUTOVETOR |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| PRJ      | 1   | 1/4 | 3   | 7   | 5   | 0,250     |
| MAN      | 4   | 1   | 3   | 9   | 7   | 0,490     |
| QLD      | 1/3 | 1/3 | 1   | 7   | 5   | 0,171     |
| PRZ      | 1/7 | 1/9 | 1/7 | 1   | 1/3 | 0,031     |
| PRO      | 1/5 | 1/7 | 1/5 | 3   | 1   | 0,058     |
| CR=0,091 |     |     |     |     |     |           |

Tabela A2 – Cenário B (ênfase em qualidade)

|          | PRJ | MAN | QLD | PRZ | PRO | AUTOVETOR |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| PRJ      | 1   | 2   | 1   | 4   | 3   | 0,290     |
| MAN      | 1/2 | 1   | 1/3 | 5   | 3   | 0,185     |
| QLD      | 1   | 3   | 1   | 7   | 5   | 0,390     |
| PRZ      | 1/4 | 1/5 | 1/7 | 1   | 1/3 | 0,046     |
| PRO      | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 3   | 1   | 0,089     |
| CR=0,041 |     |     |     |     |     |           |

Tabela A3 – Cenário C (ênfase em prazo)

|          | PRJ | MAN | QLD | PRZ | PRO | AUTOVETOR |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| PRJ      | 1   | 4   | 3   | 1/2 | 5   | 0,274     |
| MAN      | 1/4 | 1   | 1/3 | 1/5 | 3   | 0,076     |
| QLD      | 1/3 | 3   | 1   | 1/6 | 5   | 0,134     |
| PRZ      | 2   | 5   | 6   | 1   | 8   | 0,477     |
| PRO      | 1/5 | 1/3 | 1/5 | 1/8 | 1   | 0,039     |
| CR=0,063 |     |     |     |     |     |           |

Tabela A4 – Cenário D (ênfase em preço)

|          | PRJ | MAN | QLD | PRZ | PRO | AUTOVETOR |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| PRJ      | 1   | 4   | 3   | 7   | 1/2 | 0,309     |
| MAN      | 1/4 | 1   | 1/3 | 5   | 1/3 | 0,099     |
| QLD      | 1/3 | 3   | 1   | 7   | 1/3 | 0,174     |
| PRZ      | 1/7 | 1/5 | 1/7 | 1   | 1/7 | 0,033     |
| PRO      | 2   | 3   | 3   | 7   | 1   | 0,385     |
| CR=0,076 |     |     |     |     |     |           |

Tabela A5 – Cenário pró Fornecedor (F1)

|          | PRJ | MAN | QLD | PRZ | PRO | AUTOVETOR |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| PRJ      | 1   | 1/3 | 1/2 | 1/4 | 1/8 | 0,046     |
| MAN      | 3   | 1   | 1/3 | 1/2 | 1/8 | 0,076     |
| QLD      | 2   | 3   | 1   | 1/4 | 1/5 | 0,104     |
| PRZ      | 4   | 2   | 4   | 1   | 1/5 | 0,192     |
| PRO      | 8   | 8   | 5   | 5   | 1   | 0,581     |
| CR=0,098 |     |     |     |     |     |           |

Tabela A6 – Cenário pró Fornecedor (F3)

|          | PRJ | MAN | QLD | PRZ | PRO | AUTOVETOR |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| PRJ      | 1   | 2   | 1/8 | 1   | 1/4 | 0,068     |
| MAN      | 1/2 | 1   | 1/9 | 1/2 | 1/5 | 0,042     |
| QLD      | 8   | 9   | 1   | 7   | 8   | 0,622     |
| PRZ      | 1   | 2   | 1/7 | 1   | 1/6 | 0,064     |
| PRO      | 4   | 5   | 1/8 | 6   | 1   | 0,203     |
| CR=0,089 |     |     |     |     |     |           |

## **AUTORIZAÇÃO PARA REPRODUÇÃO**

Autorizo cópia total ou parcial desta obra, apenas pra fins de estudo e pesquisa, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem prévia autorização específica do autor

Rodrigo Lemos Pereira

Taubaté, Junho de 2011