

MÉTODO DE SELEÇÃO DE PROCESSOS DE FUNDIÇÃO BASEADO NA INTEGRAÇÃO DE LÓGICA FUZZY E DECISÃO MULTICRITÉRIO

Dalmarino Setti, dalmarino@utfpr.edu.br¹

Carla Schwengber ten Caten, tencaten@producao.ufrgs.br²

¹UTFPR, Via do Conhecimento km 1- COELM, Pato Branco, PR.

²UFRGS, Osvaldo Aranha 99, 5º andar- LOPP, Porto Alegre, RS.

Resumo: A seleção do processo adequado para fabricar um componente é uma importante tarefa que ocorre nos estágios iniciais do projeto. Em processos de fundição de metais, selecionar o processo mais adequado pode ser uma tarefa complexa, em função do elevado número de processos disponíveis, os quais diferem em termos de capacidade, qualidade, produção, custo e vantagens e limitações em relação ao projeto. A correta seleção do processo de fundição proporciona redução do tempo de desenvolvimento, aumento da qualidade, redução de custo e aumento da competitividade do produto. Este trabalho apresenta um método de seleção de processos de fundição de metais baseado na integração de lógica fuzzy com decisão multicritério. O método proposto contempla os principais processos de fundição e consiste dos módulos de seleção técnica e econômica. Neste trabalho, o módulo de seleção técnica que compreende as etapas de separação inicial e classificação é apresentado. Na etapa de separação inicial, um algoritmo de análise de cluster é utilizado para eliminar os processos que não atendem aos requisitos do produto (material e características geométricas). Na etapa de classificação, os processos remanescentes da separação inicial são classificados em ordem de compatibilidade em relação aos requisitos do produto. Um algoritmo especialmente desenvolvido para o método compara as capacidades dos processos na forma de dados fuzzy, como funções de pertinência e variáveis linguísticas em relação aos requisitos do componente em análise. O algoritmo gera matrizes de comparação de ordem n igual a número de processos avaliados. Cada um dos requisitos do produto avaliado possui uma matriz de comparação. O Analytic Hierarchy Process (AHP), um dos métodos de decisão multicritério mais utilizado, é empregado para resolver as matrizes de comparação e obter a classificação final dos processos. Um estudo de caso de um componente automotivo é apresentado para demonstrar o método proposto.

Palavras-chave: Fundição de metais, seleção de processos, lógica fuzzy, decisão multicritério.

1. INTRODUÇÃO

A seleção de processos de fabricação que ocorre nos estágios iniciais do projeto de um componente tem a finalidade de fornecer opções de fabricação, em termos de forma, materiais e custo. Segundo Swfit e Booker (2003), entre 60 e 85% dos custos do produto são determinados nesta fase, enquanto que apenas 5 a 7% dos custos são incorridos efetivamente nesta etapa. Portanto, existem grandes oportunidades para redução de custos no início do desenvolvimento do componente mecânico, pois quanto mais os problemas forem prevenidos nesta fase, por meio de um desenvolvimento adequado, menos problemas terão que ser corrigidos mais tarde, quando a solução é cara e mais difícil de ser realizada.

A seleção de processos de fundição é um campo de pesquisa importante, principalmente porque em termos de concepção, os processos de fundição de metais oferecem a maior flexibilidade entre os processos de conformação metalúrgica. A forma e o tamanho são requisitos fundamentais em termos de projeto de componentes e, nesse aspecto, as possibilidades oferecidas por esses processos são insuperáveis (Kanicki, 1988). De acordo com o *Department of Energy* (2005) componentes fundidos são encontrados em 90% dos produtos manufaturados e equipamentos. Além das questões relativas ao desenvolvimento de novos componentes, a seleção de processos de fundição é importante sob aspectos relativos à redução de custos e aumento de competitividade, aumento da qualidade dos componentes fundidos e para a melhoria da sustentabilidade do processo de fundição.

Segundo Lovatt e Shercliff (1998), a seleção de um processo adequado de produção em muitas situações envolve uma complexa interação entre características do componente, do material e do processo. A seleção de processos de fundição se enquadra nesta situação complexa, na qual as estratégias de seleção precisam ser mais refinadas para que os resultados obtidos sejam satisfatórios. Neste sentido, vários autores têm apresentado diferentes abordagens para resolver o problema da seleção de processos de fundição. Uma das primeiras tentativas utilizadas foram os sistemas especialistas, como os métodos de seleção apresentados nos trabalhos de Sirilertworakul *et al.* (1993), Darwish e El-

Tamimi (1996) e Er e Dias (2000). A base de dados adotada nesses sistemas utiliza valores únicos para as capacidades dos processos nos quais as regras de seleção são baseadas, o que não reflete a realidade dos processos de fundição, os quais possuem faixas de capacidades. O trabalho de Akarte *et. al.* (1999) apresentou uma abordagem de seleção de processos de fundição baseada na utilização de dados quantitativos dos processos na forma de funções de pertinência (*fuzzy*) na qual a compatibilidade do componente em análise em relação a cada processo era determinada por meio de um *ranking* que refletia o desempenho de cada processo em relação aos requisitos do componente.

Este trabalho apresenta um método de seleção de processos de fundição de metais baseado na integração de lógica *fuzzy* com decisão multicritério, denominado Método Multicriterial de Seleção de Processos de Fundição (MMSPF). Este contempla os principais processos de fundição, sendo seu escopo de aplicação no estágio inicial do desenvolvimento de componentes fundidos. A finalidade do desenvolvimento desse método é auxiliar projetistas na correta seleção de processos de fundição de metais, destinados a produção de componentes mecânicos.

Para atingir os objetivos propostos, inicia-se com a apresentação das etapas que compõe o módulo de seleção técnica do MMSPF. Na seção seguinte um exemplo de aplicação é desenvolvido. Para acelerar a execução do método, as operações dos algoritmos do MMSPF foram realizadas em planilha eletrônica e as interfaces com o usuário foram desenvolvidas em linguagem C Sharp (C#) com o aplicativo Visual Studio 2008 da Microsoft. Ao final do trabalho são apresentadas as conclusões obtidas com a aplicação do módulo de seleção técnica do MMSPF.

2. MÉTODO MULTICRITERIAL DE SELEÇÃO DE PROCESSOS DE FUNDIÇÃO

O Método Multicriterial de Seleção de Processos de Fundição (MMSPF) é constituído pelos módulos de seleção técnica e econômica. Na seleção técnica, os diferentes processos são avaliados para verificar aqueles que são capazes de atender aos requisitos do componente. O módulo de seleção econômica, por sua vez, avalia diferentes processos de fundição de metais ou variações de um mesmo processo de fundição, desde que atendam aos requisitos técnicos mínimos para a produção do componente em análise. Neste trabalho, o módulo de seleção econômica não será abordado. A Fig. (1) apresenta as etapas do módulo de seleção técnica do MMSPF.

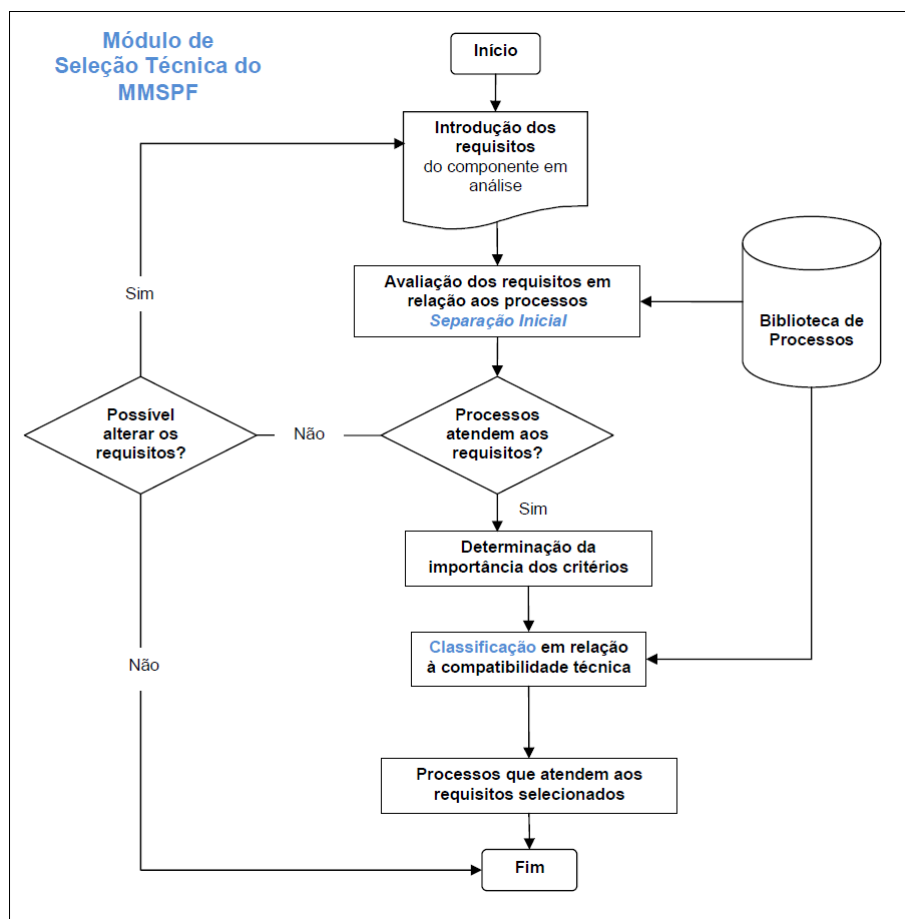


Figura 1. Etapas do módulo de seleção técnica do MMSPF.

A seguir, são descritas as etapas que compõem o módulo de seleção técnica do MMSPF.

2.1 Requisitos do Componente e Base de Dados de Processos de Fundição de Metais

Os requisitos do componente solicitados para análise, no módulo de seleção técnica do MMSPF, são separados em material e aspectos de projeto.

Em relação aos materiais, são contemplados no MMSPF ligas ferrosas, tais como, ferro fundido cinzento e nodular (FF), aços para fundição (AF) e ligas não ferrosas específicas para fundição de alumínio (LA), magnésio (LM), cobre (LC) e zinco (LZ). Como o MMSPF é destinado aos estágios iniciais do desenvolvimento do componente, não se determina uma liga específica. Essa estratégia permite selecionar o processo de fundição e, depois dessa etapa, realizar a seleção da liga adequada ao processo escolhido e que atenda aos requisitos mecânicos do componente em análise, o que facilita a tarefa de seleção do material do componente.

Aspectos de projeto como dimensões, espessuras, peso, ângulo mínimo de extração, área superficial e volume, são alguns dos requisitos contemplados. O conjunto completo dos requisitos é apresentado na seção 3, no exemplo de aplicação.

Os principais processos de fundição de metais que compõem a base de dados dos processos do MMSPF são apresentados na Tab. (1).

Tabela 1. Processos de fundição de metais contemplados no MMSPF.

Tipo do Molde	Processo de Fundição de Metal	Materiais Processados
Colapsável	Areia Verde – Manual	FF, AF, LA, LC, LM e LZ
	Areia Verde – Mecanizada	
	Areia Verde – Automatizada	
	Areia Silicato CO ₂	
	Areia com Resina – Cura frio	
	Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>	
	Processo Molde Cerâmico	
Moldagem em Gesso – <i>Plaster Molding</i>	<i>Investment Casting</i>	LA, LC, LM e LZ
	Processo Molde Cheio (<i>Lost Foam</i>)	
Permanente (Molde Metálico)	Fundição Centrífuga	LA, LC, LM e LZ
	Molde Permanente – Gravidade.	
	Fundição sob Pressão - <i>Die Casting</i>	
	<i>Squeeze Casting</i> - Direto	

FONTE: Adaptado de Jorstad (2008) e Kalpakjian e Schmid (2009).

A base de dados é composta por dados quantitativos e qualitativos. Em relação aos dados quantitativos, Ravi (2005) indica que as capacidades dos processos podem ser descritas em faixas, conforme apresentado na Fig. (2). Pode-se determinar quatro pontos básicos das capacidades de um processo em relação a determinada característica: um valor mínimo absoluto (a), um valor mínimo normalmente obtido pelo processo (b), um valor máximo normalmente obtido pelo processo (c) e um valor máximo absoluto (d), os quais podem ser adequadamente convertidos em funções de pertinência trapezoidais *Trap* (a, b, c, d, $\mu(x)$).

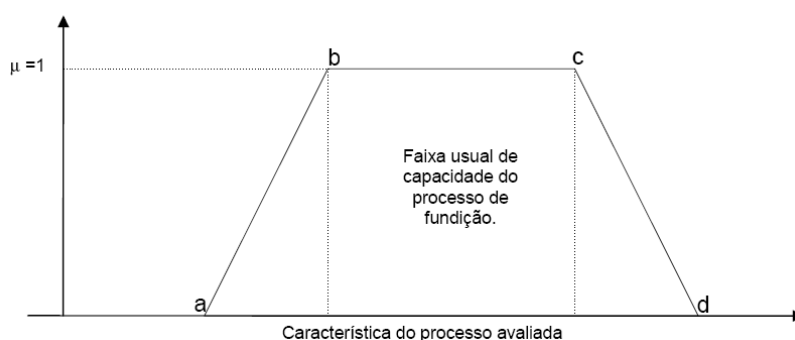


Figura 2. Capacidade do processo na forma de função de pertinência (dado fuzzy).

Segundo Jorstad (2008), os dados de processos não são absolutos e incluem sempre uma imprecisão em relação às faixas e capacidades. Por este motivo, a utilização de dados qualitativos na forma de variáveis linguísticas, possibilita incluir mais informações a respeito dos processos de fundição de metais, o que se reflete em maior precisão do método de seleção. Neste trabalho, as variáveis linguísticas utilizadas refletem o desempenho do processo em relação a algum

requisito do componente, e o conjunto utilizado é formado pelas seguintes variáveis: {muito alto, alto, médio, baixo e muito baixo}.

2.2 Separação Inicial

Para realizar esta tarefa, desenvolveu-se um algoritmo de análise de *cluster*, que permite utilizar dados qualitativos e quantitativos dos processos, e determinar aqueles que não atendem aos requisitos do componente em análise. Os requisitos utilizados como critérios para a separação inicial são: material, peso, maior e menor espessura de seção, menor diâmetro obtido de fundição, ângulo mínimo de extração e maior dimensão. Para cada material, foram criadas tabelas com dados destes sete critérios para todos os processos de fundição listados na Ta. (1).

Utilizou-se o método proposto por Ralambondrainy (1995) para converter os resultados da pesquisa em números binários. Os níveis adotados são: 0 para representar um dado discrepante em relação ao pesquisado e 1 no caso de concordância. Com base nesta conversão, e considerando que o vetor dos critérios de separação do processo j (x_{jq}) são de mesma dimensão ($d = 7$) que o componente em análise (x_{Aq}), pode-se realizar a separação inicial com base na Eq. (1).

$$Sc_j = \sum_{q=1}^7 f(x_{jq}, x_{Aq}) \quad j = 1, 2, \dots, 14. \quad (1)$$

Onde:

Sc_j é o índice de compatibilidade do processo j com o componente em análise.

$f(x_{jq}, x_{Aq})$ é a função de comparação e assume os valores de:

0, se $x_{Aq} \not\subset x_{jq}$

1, se $x_{Aq} \subset x_{jq}$

Apenas os processos que apresentarem o índice de compatibilidade igual a sete serão utilizados na etapa de classificação em relação à compatibilidade técnica.

2.3 Classificação

2.3.1 Definição de critérios e de suas importâncias

Nesta seção, são definidos os critérios utilizados na classificação em relação à compatibilidade técnica apresentados na Tab. (2) e o procedimento utilizado para determinar a importância de cada critério na seleção.

Tabela 2. Critérios utilizados na classificação em relação à compatibilidade técnica e forma dos dados para avaliação.

Critérios	Forma dos dados para Avaliação
Complexidade de forma	Variável Linguística
Mudança de forma durante produção	Variável Linguística
Nível relativo de porosidade interna	Variável Linguística
Nível relativo de propriedades mecânicas	Variável Linguística
Precisão dimensional	Variável Linguística
Rugosidade superficial	Função de Pertinência
Tolerância dimensional	Função de Pertinência

As relações empregadas para determinar a importância dos critérios utilizados na avaliação de compatibilidade técnica são apresentadas a seguir.

A importância do critério de complexidade de forma foi obtida a partir da equação proposta por Chougule e Ravi (2005), a qual é apresentada na Eq. (2).

$$CF = [0,3.Ca + 0,8.Cc - 14] \quad (2)$$

CF = Complexidade de forma.

$Cc = 100 \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \text{número de cavidades}}}\right)$

$Ca = 100 \cdot (1 - \text{área do cubo de igual volume} / \text{área superficial do componente})$

A importância do critério de complexidade de forma está associada ao resultado da Eq.(2), conforme apresentado na Tab. (3).

Tabela 3. Relações de importância dos critérios utilizados na classificação em relação à compatibilidade técnica.

Importância do Critério	Complexidade de Forma	Rugosidade Superficial	Nível Relativo de Propriedades Mecânicas e Nível Relativo de Porosidade
Muito Alta (MA)	$80 \leq CF$	$Ra < 3,2$	Mecânica de segurança
Alta (A)	$50 \leq CF < 80$	$6,3 > Ra \geq 3,2$	Mecânica estrutural
Média (M)	$30 \leq CF < 50$	$12,5 \geq Ra > 6,3$	Mecânica não estrutural
Baixa (B)	$10 \leq CF < 30$	$25 \geq Ra > 12,5$	Estética
Muito Baixa (MB)	$CF < 10$	$50 > Ra > 25$	

Em relação ao critério de mudança de forma durante a produção, a relação que expressa a importância está associada à resposta do usuário, importância alta, caso seja marcada esta opção na interface para introdução dos requisitos do componente, e importância muito baixa, caso não seja marcada esta opção.

A importância do critério de tolerância dimensional é determinada com base no grau de tolerância dimensional (*Dimensional Casting Tolerance Grade* (DCTG)) da norma ISO 8602-3: 2007, exigida para a maior dimensão linear do componente em análise. Se a tolerância dimensional estiver dentro das duas DCTG de maior precisão para a dimensão, será adotada importância muito alta; se estiver dentro da terceira e quarta DCTG, importância alta e, assim, sucessivamente para outras três variáveis linguísticas adotadas.

O critério de precisão dimensional terá sua importância determinada com base nos resultados da importância do critério de tolerância dimensional. Sendo a importância deste critério igual ao da tolerância dimensional.

A importância do critério rugosidade superficial é determinada com base nas faixas de rugosidade da norma ISO 468-3: 1982, conforme apresentado na Tab. (3).

As importâncias dos critérios de nível relativo de propriedades mecânicas e nível relativo de porosidade estão associadas ao tipo de aplicação do componente, conforme apresentado na Tab. (3).

2.3.2 Classificação em relação à compatibilidade técnica

O método de decisão multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP), proposto por Saaty (1977), foi a ferramenta utilizada para realizar a avaliação de compatibilidade técnica no MMSPF. Diferente de outros métodos de seleção, que utilizam dados de processos de fundição na forma variáveis de lógica *fuzzy*, nos quais a classificação é obtida apenas por um *ranking*, a partir da soma dos resultados das funções de pertinência, a utilização do método AHP possibilita determinar o peso de cada critério em relação aos requisitos do componente em análise, ao mesmo tempo em que avalia o desempenho de cada processo em relação a cada critério definido para realizar a seleção.

Para aplicação do método AHP, o passo inicial é a construção das matrizes de comparação quadradas de ordem n , onde n representa o número de processos de fundição que foram aprovados na etapa de separação inicial. Cada critério avaliado necessita de uma nova matriz de comparação, de modo que para a realização desta etapa são necessárias sete matrizes.

O preenchimento das matrizes necessita da realização de julgamentos pareados, onde os processos são comparados dois a dois em relação a cada critério com base em uma escala de comparação adequada. Na aplicação usual do método AHP, os julgamentos são realizados por especialistas. Neste artigo, propõe-se um procedimento para gerar os julgamentos diretamente a partir dos dados dos processos, na forma de funções de pertinência para dados quantitativos e de variáveis linguísticas, para dados qualitativos, sem a necessidade do julgamento dos especialistas. A Tab. (4) apresenta os intervalos adotados no procedimento para gerar os julgamentos a partir de dados quantitativos e qualitativos e os respectivos valores para os julgamentos, os quais são baseados nos valores da escala de Saaty (1977).

Tabela 4. Intervalos e valores do procedimento de geração de julgamentos pareados.

Valor da Função de Pertinência $\mu(x)$	Variável Linguística	Valores dos Julgamentos				
		MA	A	M	B	MB
$\mu(x) = 1,00$	Muito Alto (MA)	1	3	5	7	9
$0,80 \leq \mu(x) < 1,00$	Alto (A)	1/3	1	3	5	7
$0,50 \leq \mu(x) < 0,80$	Médio (M)	1/5	1/3	1	3	5
$0,20 \leq \mu(x) < 0,50$	Baixo (B)	1/7	1/5	1/3	1	3
$\mu(x) < 0,20$	Muito Baixo (MB)	1/9	1/7	1/5	1/3	1

A utilização dos valores extremos da escala de Saaty para realizar os julgamentos permite obter uma maior discriminação nos resultados da avaliação de compatibilidade técnica e possibilita, também, garantir uma maior uniformidade dos julgamentos realizados.

A matriz de comparação é gerada em três passos. Os elementos a_{ij} acima da diagonal principal da matriz são obtidos por meio de julgamentos pareados fornecidos pelos intervalos da Tab. (4). Os processos que aparecem na linha de ordem i são comparados com os processos da coluna de ordem j . Isso exige $n.(n-1)/2$ comparações, onde n é o número de processos. Os elementos da diagonal principal são iguais a 1. Os elementos abaixo da diagonal principal são recíprocos dos valores obtidos acima da diagonal principal, ou seja, $a_{ji} = 1/a_{ij}$;

Após a obtenção da matriz de comparações, deve-se realizar os cálculos para encontrar o máximo autovalor, o qual permite obter os valores normalizados para cada processo de fundição em relação a cada um dos critérios de classificação (vetor de prioridades). O procedimento de cálculo adotado neste passo é a normalização aditiva. As Eq. (3) e (4) apresentam a formulação matemática desse procedimento, o qual consiste em dividir os elementos de cada coluna pela soma daquela coluna e, no próximo passo, somar os elementos em cada linha e dividir esta soma pelo número de elementos da linha que, é igual ao número dos processos de fundição de metais.

$$a'_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^m a_{ij} \quad i, j = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

$$P_i = (1/m) \sum_{j=1}^m a'_{ij} \quad i, j = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

Onde:

P_i = é o desempenho do processo de fundição i em relação ao critério avaliado;

a'_{ij} = elemento normalizado da matriz de comparações.

Após a determinação do vetor de prioridades dos processos é necessário avaliar o índice de consistência desse vetor. O índice de consistência harmônico (ICH) proposto por Stein e Mizzi (2007) será o procedimento utilizado nessa avaliação. Segundo esses autores, o ICH é recomendado como medida de consistência quando se utiliza o método de normalização aditiva devido à conexão natural existente, pois ambos são obtidos a partir da soma das colunas da matriz de comparações. O ICH é apresentado na Eq. (5).

$$ICH = \left[\frac{MH_s - n}{n(n-1)} \right] / n(n-1) \quad (5)$$

Onde:

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

n = número de processos de fundição avaliados.

Após a execução desse procedimento para todos os sete critérios calcula-se a classificação final dos processos com base na Eq. (6).

$$R_i = \sum_{j=1}^7 w_j \cdot P_{ij} \quad (6)$$

Onde:

w_j = peso do critério j ,

P_{ij} = desempenho relativo do processo de fundição i em relação ao critério j ;

R_i = A classificação global do processo de fundição i em relação aos oito critérios avaliados na classificação.

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

As operações dos algoritmos do MMSPF foram realizadas em planilha eletrônica e as interfaces com o usuário foram desenvolvidas em linguagem C Sharp (C#) com o aplicativo Visual Studio 2008 da Microsoft. Para maior clareza, algumas etapas do módulo de seleção técnica do MMSPF foram apresentadas de forma detalhada no exemplo de aplicação.

3. APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

O MMSPF foi aplicado para seleção de um processo de fundição para fabricação do componente automotivo, suporte do eixo do comando de válvulas (*cam carrier*), apresentado na Fig. (3).

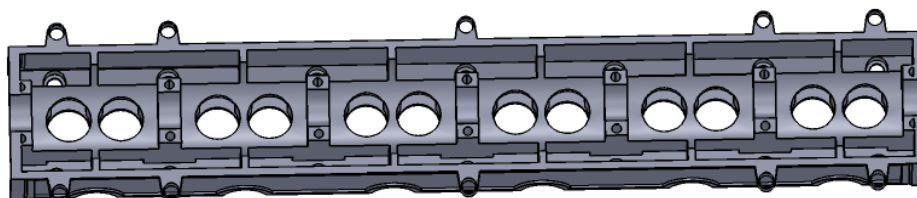


Figura 3. Componente utilizado na aplicação do método de seleção de processos de fundição de metais proposto.

Os requisitos do componente em análise são apresentados na Fig. (4)

MMSPF - Requisitos do Componente em Análise

Material: Liga de alumínio para fundição

Tipo de aplicação do componente: Aplicação mecânica (item estrutural)

Dados Dimensionais

800	Maior dimensão no eixo X (mm)
90	Maior dimensão no eixo Y (mm)
74	Maior dimensão no eixo Z (mm)
4	Menor espessura de seção (mm)
24	Maior espessura de seção (mm)
4425	Área superficial total (cm ²)
1296	Volume total (cm ³)
3,5	Peso do componente (kg)
2	Ângulo de extração mínimo (graus)
30	Menor diâmetro obtido de fundição (mm)
12	Número de macho cavidades necessárias
± 2	Tolerância dimensional no eixo X (mm)
-	Tolerância dimensional no eixo Y (mm)
-	Tolerância dimensional no eixo Z (mm)

Processos complementares: Parcialmente Usinado

Detalhamento superficial importante

Mudança de forma durante produção

Requisitos para Avaliação Econômica

50000 Tamanho do lote anual (unidades)

Demanda total do componente no ciclo de vida (unidades)

Custo do material

Perfil do produto:

Selecionar Processo

Figura 4. Tela da interface para inserção dos requisitos do componente no MMSPF.

A separação inicial é a etapa que tem a finalidade de eliminar os processos de fundição que não atendem aos requisitos básicos do componente em análise. A Tab. (5) apresenta os processos de fundição aprovados na etapa de separação inicial para o componente em análise.

Tabela 5. Resultado da etapa de separação inicial para o componente em análise.

Processo de fundição de metais aprovados na etapa de separação inicial
Areia Verde – Manual
Areia Verde – Mecanizada
Areia Silicato CO ₂
Areia com Resina – Cura frio
Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>
Processo Molde Cerâmico
<i>Lost Foam</i>
Molde Permanente – Gravidade.

Do conjunto de quatorze processos da base de dados, seis processos foram eliminados nesta etapa, sendo selecionados oito processos para a classificação. Os processos de moldagem em areia verde automatizada e *investment casting* foram eliminados por não atender ao requisito de maior dimensão do componente (dimensão do eixo x). Os processos de moldagem em gesso (*plaster molding*) e *die casting* foram descartados em função da limitação em relação à seção máxima, o processo *squeeze casting* em função da espessura de seção mínima e o processo de fundição centrífuga em função do peso mínimo.

A partir dos dados do componente em análise, e com base no procedimento descrito na seção 2.3.1, determinou-se a importância dos critérios utilizados para realizar a seleção do processo de fundição de metais do componente em análise. Os resultados são apresentados na Tab. (6).

Tabela 6. Critérios utilizados na avaliação de compatibilidade técnica e suas respectivas importâncias.

Critérios para Avaliação da Compatibilidade Técnica	Importância dos Critérios	Peso dos Critérios
Complexidade de forma	Alta	0,163
Mudança projeto durante produção	Muito baixa	0,023
Nível relativo de porosidade interna	Alta	0,163
Nível relativo de propriedades mecânicas	Alta	0,163
Precisão dimensional	Alta	0,163
Rugosidade superficial	Alta	0,163
Tolerância dimensional	Alta	0,163

Com os pesos dos critérios determinados, realiza-se a avaliação dos oito processos selecionados na etapa de separação inicial em relação a cada um dos sete critérios utilizados na avaliação de compatibilidade técnica. Como exemplo de aplicação da etapa de classificação, a Tab. (7) apresenta os resultados para a avaliação dos processos em relação ao critério de rugosidade superficial (Ra) em relação em a especificação do componente para esse requisito, o qual apresenta o valor de 6 μm de rugosidade superficial (Ra).

Tabela 7. Resultado da comparação da rugosidade superficial exigida pelo componente em análise em relação aos oito processos selecionados na separação inicial.

Processo	Funções de Pertinência para Rugosidade Superficial (Ra) em μm ⁽¹⁾				
	a	b	c	d	$\mu(x)$
Areia Verde – Manual	3,2	5	25	50	1,00
Areia Verde – Mecanizada	1,6	4,7	9,2	12,5	1,00
Areia Silicato CO ₂	1,6	5,7	11,5	12,5	1,00
Areia com Resina – Cura frio	1,6	5,7	11,5	12,5	1,00
Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>	0,8	1,8	3,5	12,5	0,72
Processo Molde Cerâmico	0,8	1,4	4	6,3	0,13
<i>Lost Foam</i>	2,3	3	4,1	6,3	0,14
Molde Permanente – Gravidade.	0,8	2	6	6,3	1,00

LEGENDA: (1) Os dados utilizados na construção das funções de pertinência são provenientes das seguintes fontes: Swift e Booker (2003); Kalpakjian e Schmid (2009); Davis (1993).

A partir da comparação dos dados *fuzzy* dos processos, em relação ao requisito de rugosidade superficial do componente, o procedimento para gerar julgamentos pareados apresentado na Tab. (4) fornece a matriz de julgamentos, a qual é resolvida pelo método da normalização aditiva apresentado nas equações (4) e (5). O resultado dessas equações

é o vetor de desempenho dos processos em relação ao critério. A solução da matriz de julgamentos apresentou um $RC=0,00131$. Essas etapas são apresentadas na Fig.(5).

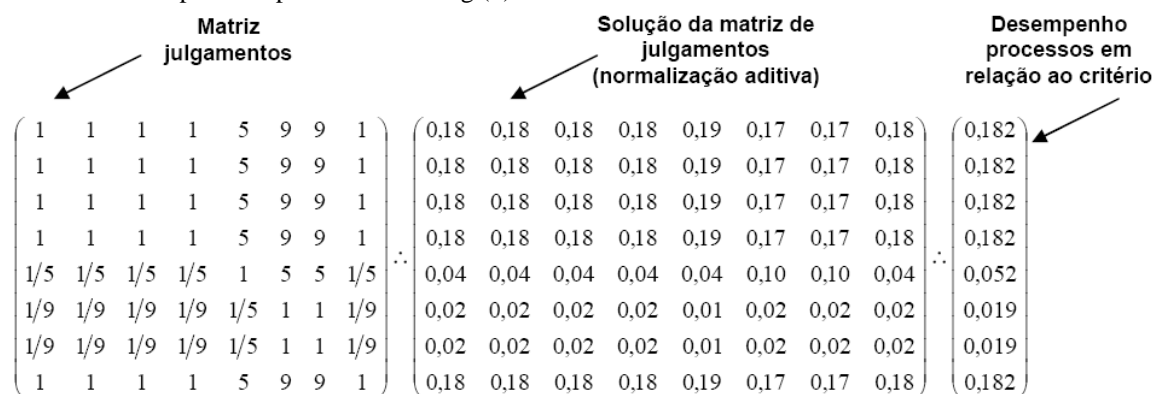


Figura 5. Aplicação do método AHP na determinação do desempenho dos processos em relação ao critério de rugosidade superficial.

Após o desenvolvimento da avaliação de todos os sete critérios, obtém-se a classificação final dos processos (R_i), o qual é apresentado na Tab. (8), juntamente com a compatibilidade técnica mínima e o resultado final da etapa de classificação.

Tabela 8. Resultado final da etapa de avaliação da compatibilidade técnica.

Resultado da Avaliação de Compatibilidade Técnica (R_i)	Compatibilidade Técnica Mínima	Processos Selecionados
Areia Verde – Manual	0,111	
Areia Verde – Mecanizada	0,137	
Areia Silicato CO_2	0,119	
Areia com Resina – Cura frio	0,152	Molde Permanente – Gravidade
Areia com Resina – <i>Shell Molding</i>	0,099	Areia com Resina – Cura frio
Processo Molde Cerâmico	0,114	Areia Verde – Mecanizada
<i>Lost Foam</i>	0,097	
Molde Permanente – Gravidade	0,170	

Como resultado da aplicação do módulo de seleção técnica do MMSPF ao componente automotivo suporte do eixo do comando de válvulas, foram selecionados os processos de areia com resina (cura frio), molde permanente (gravidade) e areia verde (mecanizada), os quais apresentaram um valor de R_i maior do que a compatibilidade técnica mínima ($R_i=0,125$). Um componente similar foi analisado no trabalho de Er *et al.* (1996). Esses autores obtiveram como resultado do seu método de seleção os processos de fundição por molde permanente e processo *Shell Molding*. Os métodos apresentaram um processo concordante (molde permanente), um processo de mesma natureza (areia com resina, porém resinas diferentes), sendo que o MMSPF apresentou uma solução a mais (areia verde-mecanizada).

4. CONCLUSÃO

Este artigo teve como objetivo apresentar um método de seleção de processos de fundição de metais baseado na integração de lógica *fuzzy* com decisão multicritério, denominado Método Multicriterial de Seleção de Processos de Fundição (MMSPF). As principais conclusões do trabalho foram:

(i) o módulo de seleção técnica do MMSPF exposto neste trabalho, apresenta duas etapas: separação inicial e classificação. A separação inicial realiza uma análise sequencial dos requisitos técnicos, eliminando processos não capazes. Já a classificação gera um valor de R_i que é comparado ao valor da compatibilidade técnica mínima, classificando os processos com maior compatibilidade técnica para serem avaliados em relação aos aspectos econômicos;

(ii) a aplicação do método ao componente automotivo suporte do eixo árvore do comando de válvulas apresentou, como resultado do módulo de seleção técnica, os processos de areia com resina (cura frio), molde permanente (gravidade) e areia verde (mecanizada).

(iii) o MMSPF possibilitou a inclusão de mais dois processos (areia resina - cura frio e areia verde - mecanizada) como opções para a fabricação do componente analisado, adotando os requisitos do componente como foco principal do método de seleção, e incorporando dados qualitativos dos processos de fundição, na forma de variáveis lingüísticas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e a Fundação Araucária pelo apoio financeiro que possibilitou a execução deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Akarte, M. M.; Ravi, B.; Creese, R. C., 1999, "Casting process selection using AHP and fuzzy logic", International Seminar on Manufacturing Technology, Beyond 2000, Bangalore, p. 468-482.
- Beeley, P., 2001, "Foundry Technology", Oxford: Butterworth-Heinemann, p. 3-14.
- Chougule, R. G.; Ravi, B., 2005, "Variant process planning of castings using AHP-based nearest neighbour algorithm for case retrieval", International Journal of Production Research, v. 43, n. 6, p. 1255-1273.
- Darwish, S .M.; El-Tamimi, A. M., 1996, "The selection of casting process using expert system", Computers in Industry, v. 30, n. 2, p. 77-86.
- Davis, J. R., 1993, "Aluminum and Aluminum Alloys", In: ASM. Specialty Handbook,. Metals Park: ASM International, p. 100.
- Er, A.; Dias, R., 2000, "A rule-based expert system approach to process selection for cast components", Knowledge-Based Systems, v. 13 p. 225-234.
- Er, A.; Sweeney, E. T.; Kondic, V., 1996, "Knowledge-Based System for casting process selection", Transactions of the AFS, v. 104, p. 363-370.
- International Standard. ISO 468: Surface Roughness - Parameters their values and general rules for specifying requirements. Geneva, 1982.
- International Standard. ISO 8062-3: Surface Vehicle Standard – Geometrical product specifications (GPS) — Dimensional and geometrical tolerances for moulded parts — Part 3: General dimensional and geometrical tolerances and machining allowances for castings. Geneva, 2007.
- Jorstad, J. L., 2008, "Casting shape processes – An Introduction", In: ASM. Metals Handbook, v. 15 - Casting. Metals Park: ASM International, p. 485-487.
- Kalpakjian, S.; Schmid, S. R., 2009, "Manufacturing Engineering and Technology", New York: Prentice-Hall. p. 261-285.
- Kanicki, D., 1988, "Casting advantages, applications an market size", In: ASM. Metals Handbook, v. 15 - Casting. Metals Park: ASM International, p. 54-73.
- Lovatt, A. M.; Shercliff, H. R., 1998, "Manufacturing process selection in engineering design. Part 1: the role of process selection", Materials and Design, v. 19, p. 205–215.
- Ralambondrainy, H., 1995, "A conceptual version of the k-means algorithm", Pattern Recognition, v. 16,p. 1147–1157.
- Ravi, B., 2005, "Metal Casting: Computer-aided Design and Analysis", New Delhi: Prentice-Hall of India, p. 102-104.
- Saaty, T. L., 1977, "A scaling method for priorities in hierarchical structures", Journal of Mathematical Psychology, v.15, n. 3, p. 234-281.
- Sirilertworakul, N.; Webster, P. D.; Dean, T. A., 1993, "A knowledge base for alloy and process selection for casting. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 33, p. 401-416.
- Stein, W. E.; Mizzi, P. J., 2007, "The harmonic consistency index for the analytic hierarchy process", European Journal of Operational Research, v. 177, p. 488-497.
- Swift, K. G.; Booker, J. D., 2003, "Process Selection from design to manufacture", Oxford: Butterworth-Heinemann, p. 19-34.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY., 2005, "Metal Casting Industry of the Future: Fiscal Year 2004 Annual Report", Washington.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

METHOD OF SELECTION OF METAL-CASTING PROCESSES BASED ON THE INTEGRATION OF FUZZY LOGIC WITH MULTICRITERIA DECISION

Abstract. *The selection of suitable process for making a component is an important task that occurs in the early stages of design. In metal-casting processes, selecting the most suitable process may become a complex task, due to the large number of processes available, which differ greatly in terms of capabilities, advantages and limitations on design, quality, production and cost. The correct selection of the casting process provides reduced development time, increase quality, reduce cost and increase the competitiveness of the product. This paper presents a method of selection of metal-casting processes based on the integration of fuzzy logic with multicriteria decision. The proposed method includes the main casting processes and consists of modules for technical and economic selection. In this paper, the selection module which comprises the steps of initial separation and classification is presented. In the initial screening step, In the initial screening step, an algorithm for cluster analysis is used to eliminate processes that do not meet the requirements of the product (material and geometric characteristics of the product). In the ranking step, the processes remaining from the initial screening are ranked in order of compatibility with the requirements of the product. An algorithm especially developed for the method compares the capabilities of the processes in the form of fuzzy data, such as membership functions and linguistic variables in relation to product requirements. The algorithm generates comparison matrices of order n equals the number of processes evaluated. Each of the product evaluated requirements has a comparison matrix. The Analytic Hierarchy Process (AHP), one of the tools of multicriteria decision most used, is employed to solve the comparison matrices and get the final ranking of processes. A case study of an automotive component is presented to demonstrate the proposed method.*

Keywords: *metal casting, process selection, fuzzy logic, multicriteria decision-making.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.