

## SELEÇÃO DE PROCESSOS DE FUNDIÇÃO BASEADO NO QFD

Anderson Tonello Bringhenti (andersontb8@gmail.com) – Universidade do Estado de Santa Catarina

Danielle Bond (dbond@onda.com.br) – Universidade do Estado de Santa Catarina

Guilherme Verran 2 (dem2gov@joinville.udesc.br); – Universidade do Estado de Santa Catarina

Régis Kovacs Scalice (rkscalice@gmail.com) – Universidade do Estado de Santa Catarina

### Resumo

*A seleção do processo de fabricação na etapa de desenvolvimento do produto é uma tarefa de extrema importância, pois uma falha nesta etapa pode aumentar significativamente o tempo de projeto e produção. Em casos mais críticos pode levar a falha do processo na linha de fábrica ocasionando custos extremamente altos. O objetivo deste trabalho é propor um seletor de processos de fundição utilizando um modelo conceitual com base nos princípios do Desdobramento da Função Qualidade (QFD), o qual pode ser utilizado na etapa inicial do desenvolvimento do produto. A metodologia propõe relacionar as funções principais do componente a ser fundido com as características (massa, mínima espessura de seção, ângulo de saída, rugosidade superficial, tolerância dimensional, lote mínimo e lead time) de cada processo através de uma matriz correlação resultando em índices de importância de tais características. Na sequência relacionar estes índices com a capacidade de cada processo de fundição abordado, obtendo-se assim o processo mais recomendado para o caso em questão. Para verificação do seletor um exemplo foi realizado e comparado com a literatura. Os resultados obtidos demonstram uma boa concordância entre os métodos confrontados, destacando-se a classificação quantitativa determinada pelo seletor proposto.*

**Palavras-chave:** Seletor de processos; Fundição; QFD.

**Área:** GDP e Sustentabilidade

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil o setor de fundição emprega cerca de 62.000 trabalhadores com faturamento, somente em março de 2013, de 88 milhões de dólares. A maioria das empresas é de pequeno e médio porte, com predomínio do capital nacional (ABIFA, 2013). Vários são os processos disponíveis para a fabricação de fundidos, porém observa-se uma tendência dos projetistas a conceber as peças de acordo com os processos e materiais com o qual tem maior familiaridade. Esta ação tem como consequência a exclusão de combinações de processos e materiais que poderiam ser mais econômicas (BOOTHROYD, 2002). Neste sentido a seleção de processos de fabricação possui um papel importante, pois permite indicar processos de fabricação mais adequados às características da peça, resultando em economia de tempo e custo, bem como aumento de confiabilidade pela menor probabilidade de falha da produção do componente.

Em uma revisão da literatura constatou-se que os métodos de seleção de processos de fabricação disponíveis não levam em consideração as funções principais do componente a ser fabricado no início da seleção. Também se pode observar que a importância das características dos processos não é obtida no seletor dependendo assim de uma avaliação prévia ou das considerações do projetista.

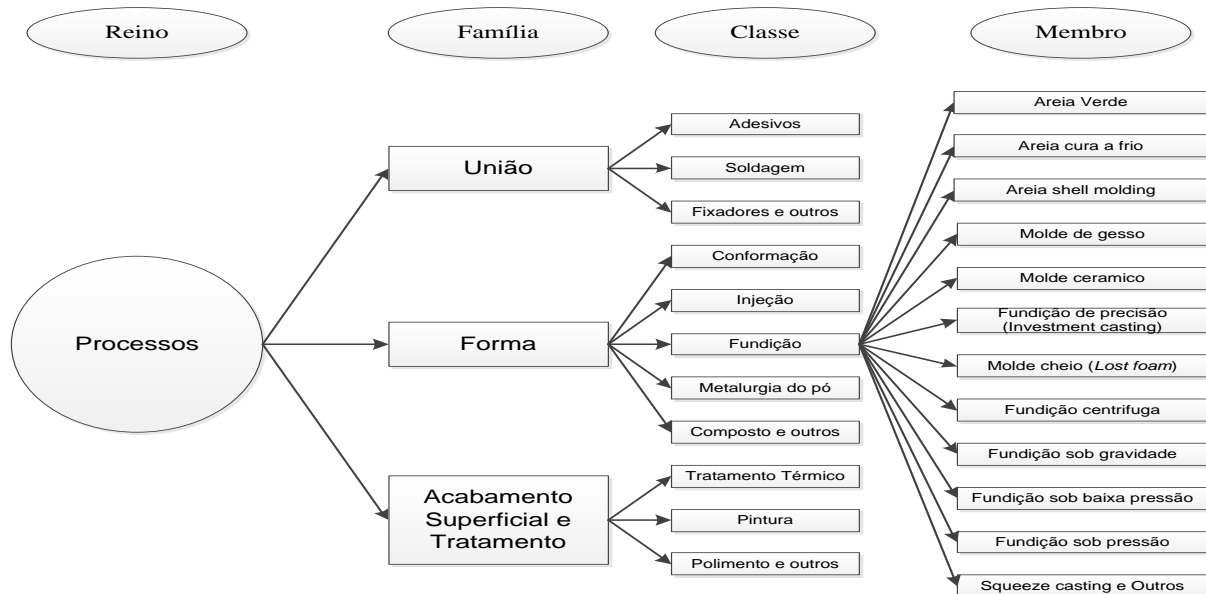
Neste contexto o trabalho aqui descrito tem o objetivo elaborar um seletor de processos de fundição utilizando um modelo conceitual com base nos princípios do *Quality Function Deployment* (QFD), uma vez que esta ferramenta já é amplamente utilizada pelos projetistas, sendo capaz de traduzir as funções principais da peça em importância das características dos processos, as quais são utilizadas na seleção. Para tanto, utilizou-se métodos de pesquisa bibliográfica, bem como elementos de pesquisa explicativa, visando gerar um novo modelo baseado na estrutura do QFD.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No desenvolvimento de um novo componente o primeiro passo é a especificação de sua função no produto. Funções ligadas às necessidades do consumidor ou ao funcionamento do produto possuem maior valor perante o mercado, e deve ser privilegiadas, enquanto procura-se reduzir o número de peças que possuem funções secundárias no produto. Com base na função definem-se os requisitos de forma e material da peça que, por sua vez, além de estarem relacionados entre si, também determinar o universo de opções de processos de fabricação (ASHBY, 2005). Esta correlação entre função, forma, material e processo é essencial no entendimento das formas de seleção de processos.

Ashby (2005) e Magrab (1997) fazem a seleção dos processos a partir da utilização de matriz comparativa entre os requisitos do componente e capacidades do processo. A seleção realizada por esses autores é ampla e abrange todas as classes do reino dos processos e só considera os membros mais comuns. A correspondência entre reino dos processos, família, classe e membros é apresentada por Ashby (2005), tal qual ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Correspondência entre reino, família, classe e membros.



Fonte: Ashby (2005).

Na literatura podem-se encontrar diversas formas de seleção de processo, focadas na seleção do membro, dentre as quais se podem citar: sistema especialista, mapas de informação de processo, métodos racionais, método multicritério e QFD.

A seleção a partir de um sistema especialista (DARWISH; EL-TAMIM, 1995; ER; DIAS, 2000) consiste na identificação das alternativas que são relevantes e ranqueá-las de acordo com o seu desempenho ou na conversão de uma base de conhecimento em regras se-então (*if-then*).

A seleção de processo pode, a partir de mapas de informação de processo (PRIMAs), fornecer um meio para o detalhamento tecnológico e econômico de cada processo, onde a principal característica é a inclusão da capacidade do processo. Esta é abordada com os índices de processos como Cpk (*Process Capability Index*) e a escolha é feita a partir de seis passos, sendo eles: (1) obtenção da produção anual necessária; (2) escolha do material que satisfaz as condições necessárias; (3) escolha dos processos a serem utilizados na PRIMA; (4) formulação da PRIMA; (5) consideração do posicionamento de mercado do

processo e obtenção do custo estimado para as possíveis alternativas; (6) tratamento do processo selecionado e comparação com os requerimentos do componente (SWIFT; BOOKER, 2003).

Na forma de método racional o procedimento de seleção avalia os processos de acordo com as suas propriedades e características, classificando-os na base de dados a partir do peso de cada critério. O procedimento da seleção é baseado no princípio de que as características da peça restringirão a utilização de alguns processos de fabricação. Darwish, Tamimi; Al-Habdan (1997) apresentam este tipo de método para selecionar processos de soldagem.

O método multicritério para a seleção de processos de fundição (MMSPF), proposto por Setti (2010), é constituído pelos módulos de seleção técnica, que é destinado a antecipar as atividades de seleção de processos na fase de projeto preliminar, e pelo módulo de seleção econômica, como forma de antecipar as atividades de seleção de processos necessárias à fase de projeto detalhado.

Todos os seletores citados anteriormente fazem a seleção dos processos de fundição a partir da comparação das características dos componentes tais como massa, mínima espessura de seção e tolerância com as capacidades dos processos. Somente Swift e Booker (2003) consideram os requisitos da peça no final da seleção de forma a comparar com os requisitos obtidos. Darwish; Tamimi; Al-Habdan (1997) e Setti (2010) atribuem pesos, para cada processo de produção, como forma de atribuir valores para as características consideradas mais importantes. Diferentemente destes métodos é possível atribuir importância às características dos processos aplicando-se o conceito de QFD. Chakraborty; Dey (2007) utilizaram este método na forma de matriz prioritária de comparação. Nesta matriz a comparação é feita utilizando números ou símbolos que representam a força de relação entre as propriedades. As características de material e forma aplicáveis são consideradas fatores críticos de forma que quando o processo não atende o requisito este é excluído da avaliação; já para os processos aprovados pelas características críticas ocorre uma avaliação individual a qual fornece um índice que representa o processo em uma determinada aplicação. O processo com o maior índice é considerado o mais adequado. Os autores utilizaram com sucesso este método como forma de selecionar processos não tradicionais de usinagem.

Portanto os métodos de seleção de processos de fabricação disponíveis não levam em consideração as funções principais do componente a ser fabricado no início da seleção. Também se pode observar que a importância das características dos processos não é

obtida no seletor dependendo assim de uma avaliação prévia ou das considerações do projetista. Neste contexto o trabalho aqui descrito tem o objetivo elaborar um seletor de processos de fundição utilizando um modelo conceitual com base nos princípios do QFD, uma vez que esta ferramenta já é amplamente utilizada pelos projetistas, sendo capaz de traduzir as funções principais da peça em importância das características dos processos, as quais são utilizadas na seleção.

### **3. DESENVOLVIMENTO E ESTRUTURA DO MODELO CONCEITUAL**

Cheng; Melo Filho (2007) afirmam que o uso do método QFD originalmente objetivava duas finalidades específicas: (1) auxiliar no processo de desenvolvimento do novo produto, buscando, traduzindo e transmitindo as necessidades e desejos do cliente; e (2) garantir a qualidade. Chakraborty; Dey (2007) afirmam que um pré-requisito para a implementação do QFD é a pesquisa de mercado, a qual é capaz de entender o que o consumidor deseja, o tamanho da importância das características do produto bem como será o desempenho das diferentes características do produto. Isto é considerado como sendo a gerência da ferramenta para modelar a dinâmica do desenvolvimento do processo de desenvolvimento. A característica do QFD de fazer facilmente comparações entre diferentes atributos e critérios auxilia na análise da influência do critério (CHAKRABORTY; DEY, 2007).

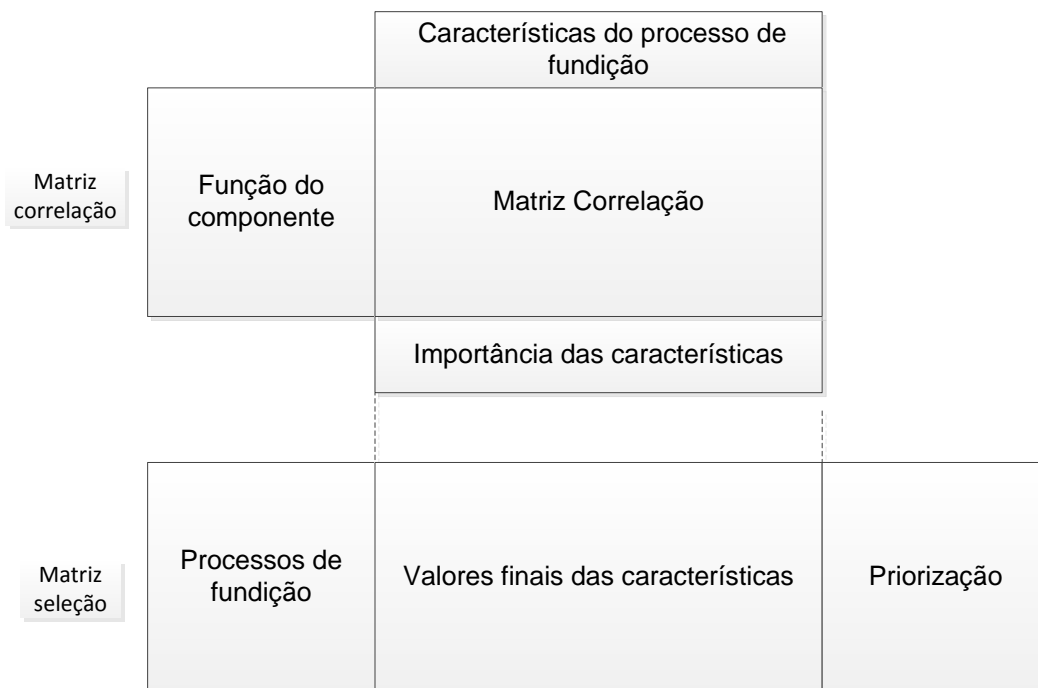
O modelo conceitual é o conjunto formado pelas tabelas e matrizes de um determinado projeto de desenvolvimento. Um modelo conceitual completo contempla quatro dimensões de desdobramento: desdobramento da qualidade positiva (ou simplesmente desdobramento da qualidade), da tecnologia, do custo e da confiabilidade (ou qualidade negativa). Entretanto, a decisão sobre efetuar ou não o desdobramento nessas quatro dimensões depende dos objetivos de cada projeto de desenvolvimento. Portanto, pode-se dizer que o tipo do modelo conceitual a ser construído é inteiramente dependente dos objetivos do projeto, do tipo de empresa e da natureza do produto (CHENG; MELO FILHO, 2007).

Neste trabalho é apresentado um modelo conceitual como uma ferramenta para a seleção do processo de fundição, a qual foi desenvolvida tendo-se como base os princípios do QFD. O modelo utilizado, ilustrado na Figura 2, é composto por duas partes: (a) Matriz correlação e (b) Matriz para a realização da seleção. Para fins de avaliação do método proposto e melhor interface com o usuário, as matrizes foram construídas em uma planilha eletrônica.

A matriz de correlação tem a função de correlacionar a função do componente e as características do processo de fundição e assim obter a importância das características (massa, mínima espessura de seção, ângulo de saída, rugosidade superficial, tolerância dimensional, lote mínimo e lead time) de cada processo. Nesta matriz

a correlação deve ser feita de forma a obedecer a uma escala que varia de 0 a 5, onde 0 representa correlação nula e 5 correlação muito forte.

Figura 2 – Modelo conceitual para a seleção de processos de fundição.



Fonte: Elaboração própria.

As características dos processos de fundição a serem utilizadas no seletor foram escolhidas a partir de pesquisa bibliográfica dentre os seletores disponíveis conforme Tabela 1.

O critério de seleção “material” foi estabelecido entre materiais ferrosos ou não ferrosos, pois alguns processos de fundição não se aplicam em ambos os casos; já para os demais critérios foram estabelecidas quatro classes para cada característica dos processos de fundição, sendo elas: 1) mínimo extremo, 2) mínimo usual, 3) máximo usual e 4) máximo extremo, como exemplificado na Tabela 2. Os valores mínimo e máximo usual utilizou-se como referência Metalcasting Design and Purchasing (2012); sendo que os extremos foram determinados a partir da comparação entre os valores sugeridos por Metalcasting Design and Purchasing (2012), Swift; Booker (2003), ASM Handbook (1998) e Bralla (2006). Devido ao fato da dimensão da peça influenciar o valor da tolerância dimensional, para esta característica é preciso informar a dimensão que necessita da tolerância dimensional.

Tabela 1 – Critérios de seleção adotados e autores de seletores de processo de fundição.

Critérios de seleção	SWIFT;				
	DARWISH (1995)	ER; DIAS (2000)	BOOKER (2003)	KARTHIK (2002)	SETTI (2010)
Material	X	X	X	X	X
Massa (kg)	X	X	X	X	X
Mínima espessura de seção (mm)	X	X	X	X	X
Ângulo de saída (°)			X	X	X
Rugosidade superficial (Ra)	X		X	X	X
Tolerância dimensional (mm)	X	X	X	X	X
Lote mínimo (peças por ano)	X	X	X	X	X
Lead Time (Dias)				X	X

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2 – Valores característicos de massa o Processo de Fundição em areia verde (automatizada).

Referência Bibliográfica	Mínimo extremo	Mínimo usual	Máximo usual	Máximo extremo
Metalcasting Design and Purchasing (2012)	0,11	0,45	90	450000
Swift e Booker (2003)	0,025	-	-	400000
ASM Handbook (1998)	-	-	-	-
Bralla (2006)	0,03	-	-	200000
<b>Utilizados</b>	<b>0,025</b>	<b>0,45</b>	<b>90</b>	<b>450000</b>

Fonte: Elaboração própria.

Na matriz seleção, para a obtenção da matriz priorização, os valores das características são comparados entre os processos de fundição (para metais ferrosos): areia verde manual,



areia verde automatizada, areia com resina de cura a frio, areia com resina *shell molding*, molde cheio, processo de molde cerâmico, fundição de precisão (*investment casting*), fundição centrífuga com molde de areia e fundição com molde permanente sob gravidade. Desta comparação são determinados os indicadores da capacidade do processo variando de 0, 1 e 2 correspondentes a faixa na qual o valor da característica da peça em questão se encontra. Sendo que:

- 0: Valor da característica acima do máximo extremo ou abaixo do mínimo usual;
- 1: Valor da característica entre o mínimo usual e mínimo extremo ou entre o máximo usual e o máximo extremo;
- 2: Valor da característica entre o mínimo usual e máximo usual;

O índice de cada característica, portanto, é obtido pela multiplicação do valor correspondente a capacidade do processo, que varia de 0 a 2, com a importância obtida das características pela matriz correlação. Assim a nota de cada processo é resultado da soma dos valores dos índices das características para cada processo de fundição, os quais são padronizados numa faixa de 0 a 10 (obtidos através da sua divisão pelo valor máximo e multiplicado por 10) facilitando a interpretação do resultado final. Caso algum processo obtenha índice 0 em alguma característica, este processo terá como nota final, ou seja, o processo é incapaz de fabricar o componente nas características desejadas.

A mesma sistemática de seleção para os metais ferrosos mostrada anteriormente pode ser utilizada para os materiais não ferrosos sendo, preciso apenas incluir os seguintes processos de fundição na matriz seleção: molde permanente baixa pressão, fundição sob pressão, forjamento líquido (*squeeze casting*) e fundição centrífuga com molde permanente (substituindo com molde em areia).

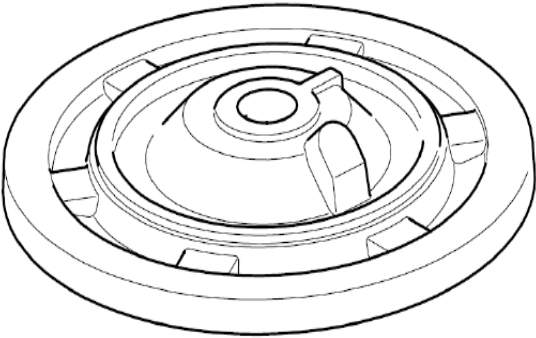
#### 4. VERIFICAÇÃO DO MÉTODO

Para demonstrar e verificar o método de seleção de processo de fundição proposto foi escolhido uma peça fundida (Figura 3) definida a partir de um exemplo de seleção realizado por Setti (2010).

O primeiro passo do método proposto neste trabalho é a identificação das funções da peça a fim de obter as importâncias das características dos processos de fundição através da matriz correlação. Porém esta etapa não foi realizada, uma vez que em Setti (2010) não há informações disponíveis para tanto, tendo sido utilizado os valores de importância estabelecidos pelo próprio autor.



Figura 3 – Quadro resumo das características da peça fundida escolhida.

	Características	Valores meta
	Massa (kg)	10,7
	Mínima espessura de seção (mm)	6,5
	Ângulo de saída (°)	1,5
	Rugosidade superficial (Ra)	Não informada
	Tolerância dimensional (mm)	1,5
	Lote mínimo (peças por ano)	750
	Lead Time (Dias)	Não informado

Fonte: Adaptado de Setti (2010).

Para a etapa de confecção da matriz seleção, os valores meta de cada característica da peça foram comparados aos valores da capacidade do processo (mínimos extremo e usual, e máximos usual e extremo), sendo estabelecidos os indicadores da capacidade do processo (de 0 a 2). Tomando-se, por exemplo, a massa e o processo de areia verde automatizado (Tabela 2), notam-se que o valor meta de 10,7 kg encontra-se na faixa de mínimo usual (0,45 kg) e máximo usual (90 kg), portanto, o indicador da capacidade do processo é 2. No passo seguinte, a importância da característica (0,104) é multiplicada pelo seu respectivo indicador da capacidade do processo (2), resultando no valor final da característica (0,208). A nota para a priorização de cada processo é obtida através da somatória dos valores finais de cada característica.

No exemplo utilizado por Setti (2010) foram selecionados os seguintes processos: areia verde automatizada, areia com resina de cura a frio, *shell molding* e molde permanente por gravidade (Figura 4). No seletor apresentado neste trabalho foram selecionados os mesmos processos, entretanto os mesmos se apresentam classificados por ordem de importância, obtendo-se como o processo mais indicado o de areia com resina e cura a frio, seguido dos processos molde permanente por gravidade e areia verde automatizada e *shell molding*.

## 5. CONCLUSÃO

A proposição de um método de seleção de processo de fundição baseado no QFD, por si só, traz uma grande facilidade na aplicação devido ao amplo conhecimento do método por parte dos profissionais de desenvolvimento de produtos. O método apresenta também a vantagem interpretar as características de cada componente de forma eficiente e apresentar os resultados da seção na forma de ranking, permitindo uma grande facilidade de análise e interpretação dos resultados.

Figura 4 – Matriz seleção para determinação da priorização dos processos de fundição para a peça estudada.

	Massa	Mínima Espessura	Ângulo de saída	Rugosidade Superficial	Tolerância dimensional	Lote Mínimo	Lead Time	Nota para priorização	Priorização
<b>Importância das características</b>	<b>0,104</b>	<b>0,02</b>	<b>0,063</b>	<b>NI</b>	<b>0,063</b>	<b>0,063</b>	<b>NI</b>		
Areia verde – manual	0,208	0,04	0	1	0	0,126	1	0	-
Areia verde – automatizada	0,208	0,04	0,063	1	0,063	0,126	1	2,5	2
Areia com resina - cura a frio	0,208	0,04	0,063	1	0,126	0,126	1	2,56	1
Areia com resina - <i>Shell Molding</i>	0,208	0,04	0,063	1	0,063	0,063	1	2,43	3
Processo molde cerâmico	0,208	0,04	0,126	1	0	0,063	1	0	-
Fundição de precisão ( <i>Investment casting</i> )	0,104	0,04	0,126	1	0,126	0	1	0	-
Molde cheio – ( <i>lost foam</i> )	0,208	0,04	0,126	1	0,126	0	1	0	-
Fundição centrífuga - molde de areia	0,208	0,04	0,126	1	0	0,063	1	0	-
Molde permanente – gravidade	0,208	0,04	0,063	1	0,126	0,063	1	2,5	2

Fonte: Elaboração própria.

Outro elemento importante objetivado na realização do método de seleção de processo de fundição era a confiabilidade do mesmo. Ainda nos estágios iniciais de seu desenvolvimento, o procedimento proposto já apresentou resultados compatíveis com aqueles encontrados na literatura.

Em sua estrutura atual a ferramenta proposta trabalha no estágio inicial do desenvolvimento de produtos, uma vez que a seleção de processos é mais importante nesta etapa. Portanto para trabalhos futuros pretende-se a ampliação de seu uso nesta etapa de projeto ampliando-se as ferramentas nele compostas com a implementação das ferramentas de DFM tornando a ferramenta uma grande auxiliadora do projetista no desenvolvimento do produto. Atualmente o método encontra-se em fase de validação para posterior implementação na indústria local.

## 6. REFERÊNCIAS

ABIFA. Índices de mercado ABIFA, 2013. Disponível em <<http://www.abifa.com.br/Imagens/file/IndicesMercado/Desempenho/2013/DESEMPENHOMARCO2013.pdf>>. Acesso em 02 junho 2013.

ASHBY, M.F. Materials Selection and Process in Mechanical Design. 3 ed. Butterworth Heinemann: Oxford, 2005.

ASM HANDBOOK. Casting. 9 ed. ASM International, 1998.

ALMANNAI, B.; GREENOUGH, R.; KAY, J. A Decision support tool based on QFD and FMEA for the Selection of Manufacturing Automation Technologies. Robotics and Computer-integrated Manufacturing. Cranfield, Bedfordshire, UK, n. 24, p. 501-507, 2008.

BOOTHROYD, G. Product Design for Manufacture and Assembly. 2 ed. Broken Sound Parkway NW: Taylor & Francis, 2002.

BRALLA, J. G. Design for Manufacturability Handbook. 2ed. Boston: McGraw-Hill, 2006.

CHAKRABORTY, S.; DEY, S. QFD – based Expert System for Non-traditional Machining Processes Selection. Expert Systems with Applications, West Bengal, India, n.32, p. 1208-1217, 2007.

CHENG, L.C.; e MELO FILHO, L.D.R. QFD: Desdobramento da Função Qualidade na Gestão de Desenvolvimento de Produtos. 2 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2007.

ER, A.; DIAS, R. A Rule-Based Expert System Approach to Process Selection for a Cast Components. Knowledge-Based Systems, Coventry, UK, n.13, p. 225-234, May. 2000.

KARTHIK, S.; CHUNG, C.; RAMANI, K.; TOMOVIC, M. Methodology for Metal Casting Process Selection. World Congress of Society of Automotive Engineers, West Lafayette, Indiana, 03M-199, 2002.

MAGRAB, Edward B. Integrated Product and Process Design and development. 1 ed. Boca Raton: CRC Press, 1997.

METALCASTING DESIGN & PURCHASING. Casting Alloy and Process Selector. Disponível em: <<http://www.metalcastingvirtuallibrary.com/afscaps/caps.aspx>> Acesso em: 10 novembro 2012.

SETTI, D.; Método Multicriterial Para a Seleção de Processos de Fundição de Metais. 171f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SWIFT, K. G.; BOOKER, J. D. Process Selection from Design Manufacture. 2 ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2003.