

MODELO DE APOIO A TOMADA DE DECISÃO PARA SELEÇÃO DE MOLDE DE AÇO OU ALUMÍNIO PARA INJEÇÃO DE POLÍMEROS

Cristiano Vasconcellos Ferreira

Xisto Lucas Travassos Junior

Higor Luiz Coelho Olenka

Luiz Miguel Sergiani Costa

Universidade Federal de Santa Catarina – Rua Dona Francisca – 8300 – Joinville - SC

cristiano.v.ferreira@ufsc.br, lucas.travassos@ufsc.br, cirleicc1705@gmail.com, higor14luiz@gmail.com, filipejesol@gmail.com

Valter Estevão Beal

Centro Universitário SENAI CIMATEC – Avenida Orlando Gomes, 1845 – Piatã – Salvador – BA

valtereb@fieb.org.br

Armando Sá Ribeiro Junior

Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Rua Prof. Aristides Novis, 02 – Federação – Salvador – BA

asrj@ufba.br

Resumo:

Injection-molded plastic components are now the predominant form of component found in industrial products. In terms of productivity, the primary challenges encountered by the industry when using injection molding are related to the fabrication time of molds and the injection cycle time. Conventionally, molds are manufactured of steel. The use of aluminum alloy molds, which have a thermal conductivity roughly four times that of steel, is a viable alternative for overcoming this difficulty. On the other hand, using aluminum molds for injection of plastic components presents significant technological challenges, including issues pertaining to mold design, simulations of the injection process, mold manufacturing, and testing. In addition, the use of an aluminum mold necessitates an economic analysis, as the mold material is more expensive than steel, but the injection process is more productive. In other words, the selection of steel or aluminum molds involves both technical and financial considerations. Decision-making involving the evaluation and management of uncertainty is becoming increasingly essential in various scientific fields. In selecting the type of material to be used in polymer injection molds, decision-making involves the presence of uncertainty, the evaluation of alternative scenarios, the existence of quantitative variables as well as subjective information, the interdependence among variables, different dimensions, and the presence of non-deterministic variables. The purpose of this paper is to present a decision support model for selecting steel or aluminum for the development of polymer injection molds. This model was constructed based on some partial results of the DEMALAP project, developed under the Rota 2030 Program, which aims to demonstrate the viability of using aluminum alloys as a base material for the production of high-productivity injection molds in order to improve the global competitiveness of the injected thermoplastic part throughout its life cycle.

Palavras-chave: *Decision Making, Steel Mold, Aluminum Mold, Requirements, Cost*

1. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, a sustentabilidade vem ganhando mais importância no cenário econômico global, devido à pressão da sociedade. Inicialmente, havia na dimensão ambiental a sua referência, e, com o tempo, passou a englobar outras dimensões, como: social, econômica e tecnológica (PEÇAS et al., 2009, 2016). Neste contexto, o desenvolvimento de moldes de alumínio para injeção de peças plásticas apresenta uma vantagem em relação aos moldes de aço. Apesar disto, é importante analisar se esta vantagem se reflete em aspectos técnicos e econômicos, considerando a produção do componente injetado.

Neste cenário, tem-se a teoria de decisão. A teoria da decisão não é uma teoria descritiva ou explicativa, já que não faz parte de seus objetivos descrever ou explicar como e/ou por que as pessoas (ou instituições) agem de determinada forma ou tomam certas decisões. Pelo contrário, trata-se de uma teoria ora prescritiva ora normativa, no sentido de pretender ajudar as pessoas a tomarem decisões melhores, em face de suas preferências básicas. (Gomes E Gomes, 2019).

Em um processo de tomada de decisão é possível identificar seis elementos comuns. São eles: decisor, objetivo, preferências, estratégia (método utilizado para a tomada de decisão), situação (aspectos ambientais, técnicos, econômicos, recursos e restrições) e resultados (consequências da tomada de decisão). Nesta mesma linha, Spetzler, Winter e Meyer (2016) apontam para que haja um processo decisório adequado, são necessários seis elementos principais, como: problema claro, informações confiáveis, prós e contras sólidos, possíveis alternativas, raciocínio e compromisso com o problema

Este trabalho tem como objeto de estudo a tomada de decisão de qual tipo de material (aço ou alumínio) utilizar para a fabricação de moldes de injeção de peças plásticas. As principais dificuldades encontradas pela indústria no uso de moldagem por injeção em termos de produtividade, estão relacionadas com o tempo de fabricação dos moldes e o tempo de ciclo de injeção.

Na indústria, os moldes para injeção de peças plásticas são tradicionalmente fabricados em aços. Uma alternativa para superar tal dificuldade é o uso de moldes fabricados com ligas de alumínio, que apresentam uma condutividade térmica cerca de quatro vezes maior do que a do aço. Por outro lado, existem grandes desafios tecnológicos em utilizar moldes de alumínio para injeção de peças plásticas, os quais envolvem questões relacionadas ao projeto do molde, simulações do processo de injeção, fabricação do molde e try-out. Ao mesmo tempo, a utilização de molde de alumínio requer uma análise econômica, pois apesar da matéria do molde ser de maior custo em relação ao aço, tem-se ganhos de produtividade no processo de injeção.

Neste contexto, a tomada de decisão pela seleção de moldes de aço ou alumínio envolve aspectos técnicos e econômicos, associados ao próprio molde e ao processo de injeção das peças. Este artigo não irá avaliar as questões relacionadas a redução do tempo de ciclo quando do uso de moldes de alumínio.

A tomada de decisão associada a avaliação e gestão da incerteza são cada vez mais importantes. Em se tratando da seleção do tipo de material empregado em moldes de injeção de polímeros, a tomada de decisão envolve além da presença de incerteza, a avaliação de cenários alternativos, a existência de variáveis quantitativas, como também informações subjetivas, a interdependência entre variáveis, diferentes dimensões e a presença de variáveis não determinísticas.

Assim, o objetivo deste artigo é apresentar um modelo de apoio à tomada de decisão para seleção de material, se aço ou alumínio, a ser empregado no desenvolvimento de moldes de injeção de polímeros. Este modelo será aplicado no projeto DEMALAP, desenvolvido no âmbito do Programa Rota 2030, o qual objetiva demonstrar a viabilidade do uso de ligas de alumínio como material base para a fabricação de moldes de injeção voltados para alta produtividade, visando potencializar a competitividade global no ciclo de vida da peça termoplástica injetada.

2. PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO

O processo de tomada é por natureza, um processo complexo, visto que muitas vezes as escolhas contêm incertezas e nem sempre é possível avaliar todos os cenários e suas variáveis de forma conjunta. O processo de tomada de decisão tem como características a presença de incertezas (Klein et al, 2007), a análise de cenários alternativos (HANSEN; ANDREASEN, 2004), o envolvimento de variáveis qualitativas e quantitativas (Honkala, Hamalainen, Salonen, 2007), a correlação entre variáveis (Ionica; Leba, 2015) e variáveis não determinísticas (Peter, Swilling, 2014).

Segundo Spetzler, Winter e Meyer (2016) para que haja um processo decisório adequado, são necessários seis elementos principais: problema claro, informações confiáveis, prós e contras sólidos, possíveis alternativas, raciocínio e compromisso com o problema. Howard (1968) divide o processo de tomada de decisão em três partes: Determinística, que tem como objetivo realizar a construção do modelo de decisão probabilística e informacional; Probabilística, que é responsável por avaliar as incertezas e riscos, através de distribuições probabilísticas das variáveis; e, Informacional, que avalia se ainda é necessário que mais informações sejam obtidas.

Pode-se dizer que existem duas correntes científicas de tomada de decisão: escola americana e europeia.

A Escola Americana tem como base teórica o conceito de agregar as informações sobre o problema em uma grande síntese (Rangel; Gomes, 2010). Fazem parte dela os métodos Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) e Analytic Hierarchy Process (AHP), sendo este último o mais relevante entre os métodos de análise hierárquica.

O MAUT é geralmente utilizado quando uma decisão é tipificada por vários objetivos, já que pode ser difícil comparar quantitativamente um com o outro. Isso permite a construção de uma função de múltiplos objetivos para identificar trade-offs e compará-los de maneira consistente. MAUT permite realizar uma análise de sensibilidade dos resultados. (Ayala e Frank, 2013). O método apresenta característica compensatória, ou seja, um comportamento muito bom segundo um critério pode compensar um comportamento ruim em outro critério. No entanto, caso se constate a dependência entre qualquer par de atributos recomenda-se que a família de critérios seja repensada e transformada, eventualmente por meio de agrupamentos ou redefinições (Neiva e Gomes, 2007).

O método AHP é o método mais utilizado, considerando-se a escola americana. Sendo capaz de avaliar de forma simples informações objetivas e subjetivas, envolvendo também graus de certeza e incerteza (Alves, 2015). Com estas características, o método adapta-se à utilização em diferentes contextos, como por exemplo no econômico, político, social ou ambiental. O método utiliza a lógica aliada à intuição, com a finalidade de obter julgamentos através de consenso e interação dos grupos decisores, permitindo resolver problemas com múltiplos critérios ainda que alguns se encontrem em conflito e com informação incompleta (Norris; Marshall, 1995).

Segundo Jansen, Shimizu e Janses (2004) o método AHP segue quatro passos fundamentalmente: decomposição do problema numa árvore hierárquica, comparação par a par dos elementos em cada nível do sistema, determinação da prioridade relativa de cada elemento e agregação das prioridades relativas para a escolha final. Uma implicação da representação com hierarquias é que se considera que as alternativas e critérios são independentes entre si, (Silva et al., 2010). Mas, alternativas e critérios totalmente independentes, dificilmente, são encontrados em situações reais. Porém, se

as relações de dependência não forem tão determinantes em um processo de tomada de decisão, o modelo pode ser mantido. Caso contrário, o modelo deve ser alterado, por exemplo, com a aglutinação de critérios dependentes.

Uma grande força do AHP é a possibilidade de medição da consistência interna dos julgamentos dos stakeholders (Vilas, 2008). Ainda, a obrigatoriedade de interação entre o analista e o decisor pode-se observar como uma vantagem, já que permite que todos os envolvidos entendam o problema da mesma forma. Por sua vez, a síntese dos resultados permite a comparação das prioridades e importância relativa de cada fator (Liberatore; Nydick, 1997; Salomon; Montevechi; Pamplona, 1999; Vilas, 2008).

A Escola Europeia utiliza a superação por meio de uma análise par a par. Esta escola possui três métodos principais. O Elimination Et Choice Translation Reality (ELECTRE), o Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations (PROMÉTHÉE) e o Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH).

O método ELECTRE, baseado no conceito de classificação, busca comparar par a par todas as alternativas, segundo cada critério examinado, para achar qual alternativa prevalece sobre a outra (MULLER; SPILIOPOULOU; LENZ, 2002). Uma alternativa se considera dominante se supera certo valor fixado de antemão arbitrariamente para cada critério (Mota; De Almeida, 2007; Muller; Spiliopoulou; Lenz, 2002).

O método baseia-se na separação e classificação das alternativas, considerando aquelas que são preferidas na maioria dos critérios de avaliação, sem causar um nível de descontentamento inaceitável para qualquer um dos critérios envolvidos, achando uma solução, que mesmo sem ser ótima pode ser considerada satisfatória.

O método Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) foi desenvolvido por (Brans; Vincke; Mareschal, 1986) numa tentativa de resolver as deficiências que existem no método ELECTRE (Muller; Spiliopoulou; Lenz, 2002). Esse método se adapta bem a problemas onde um número finito de ações alternativas deve ser ranqueado considerando vários, e por vezes antagônicos, critérios (Goumas; Lygerou, 2000). A escolha do decisor entre duas alternativas A e B é feita com a ajuda de uma função de preferência e um vetor de pesos. Isso resulta num ranking de preferência entre todas as alternativas. No entanto, o método não contempla a possibilidade de resolução de problemas que apresentem critérios inteiramente dependentes entre si, embora possibilite a análise de sensibilidade entre seus critérios, (Borges, 2019).

Existem outros métodos multicritério que, no entanto, não se enquadram exclusivamente dentro de uma dessas duas escolas (Gomes, 2006). Como exemplos de métodos multicritério que contêm elementos técnicos dessas duas escolas, podem-se citar o Método MACBETH (Bana E Costa; De Corte; Vansnick, 2012).

A metodologia Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH) foi desenvolvida por Carlos António Bana e Costa (IST-UTL), Jean Marie De Corte e Jean-Claude Vansnick, ambos da Universidade de Mons-Hainau Bélgica. É um método interativo, comumente utilizado por meio de um software desenvolvido pelos mesmos autores, que mede o grau de preferência do tomador de decisão sobre um conjunto de alternativas e ajuda-lhe a quantificar a atratividade relativa de cada uma delas, transformando avaliações qualitativas em quantitativas, (Bana; Chagas, 2002).

Embora outros métodos também realizam uma avaliação de coerência de julgamentos, a metodologia MACBETH faz uma verificação da coerência teórica e semântica, solucionando os problemas de inconsistência frequentemente apontados no AHP. (Jansen; Shimizu; Jansen, 2004; Mello; Gomes; Lins, 2001). Além disso, a metodologia MACBETH possibilita realizar uma análise de sensibilidade e robustez dos dados, (Bana; Chagas, 2002).

2. PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO NO DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAL

O processo de tomada de decisão no desenvolvimento de ferramental envolve aspectos técnicos e econômicos. Assim, considerando o projeto de uma determinada peça plástica, é possível que a empresa contratante do molde, avalie a possibilidade de produzir um molde em aço ou em alumínio para injetar as peças plásticas. Sem dúvida, este processo de tomada de decisão envolve questões técnicas relacionadas aos requisitos da peça e questões econômicas relativas ao custo de material e fabricação do molde, mas também aos ganhos de produtividade decorrentes do processo de injeção.

Por ser uma operação de produção não-seriada (sob encomenda), a construção de moldes é realizada conforme uma determinada especificação do cliente. O desenvolvimento de um ferramental, como ilustrado na Figura 1, envolve as fases de negociação, projeto, aquisição de insumos, desbastes, acabamento, montagem, tryout e entrega.

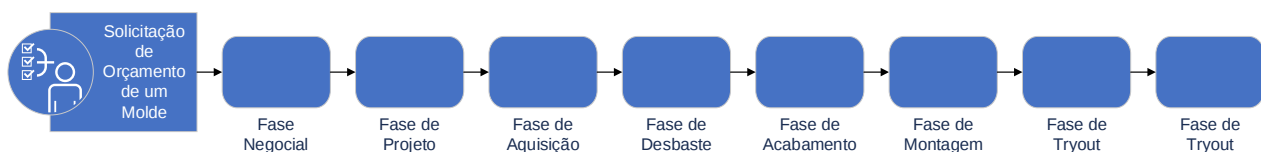


Figura 1. Etapas do desenvolvimento de um ferramental.

Na fase **negocial** são realizados estudos para estimar o custo de fabricação do ferramental. Nesta fase, juntamente, com o cliente solicitante do orçamento, pode ocorrer a opção pelo desenvolvimento de moldes de alumínio. Assim, neste momento ocorre a tomada de decisão se utilizar molde de aço ou alumínio, objeto de estudo deste artigo.

A fase de **projeto** engloba a coleta de todas as informações técnicas pertinentes ao desenvolvimento do molde, sendo elaborado o pré-projeto, o projeto definitivo, as análises computacionais (estrutural, reológica, e outras) e, finalmente, o planejamento fino da produção (detalhamento de todas as fases da construção).

A fase de **aquisição** é caracterizada pela compra dos insumos e materiais que irão compor a estrutura e acessórios do molde. São adquiridos os sistemas de aquecimento/resfriamento, automação e outros mecanismos extras.

A próxima fase envolve o **desbaste**, onde são realizadas as operações (manuais e por máquinas – torno, fresadora, retificadora, furadeira, eletroerosão a fio e de penetração, outras) que envolvem a remoção bruta de material, aproximando as superfícies do molde às formas finais do produto a ser produzido. Aqui também devem ser considerados os tratamentos térmicos necessários.

Na fase de **acabamento** são realizadas as operações (manuais e por máquinas – torno, fresadora, retificadora, furadeira, eletroerosão a fio e de penetração, outras) de obtenção da superfície final do molde. Também envolve os tratamentos superficiais.

A fase de **montagem** contempla a união e ajuste dos componentes individuais, com eventuais trabalhos manuais de polimento e/ou texturização do molde.

Na fase de **envio para teste** as atividades envolvem transporte de ferramental, viagens quando realizado fora da região de operação da ferramentaria, contratação de avaliação dimensional por entidade certificada, e outros custos.

A fase final de **entrega** compreende o processo de embalagem, relatórios de entrega, manual técnico e faturamento.

O processo de tomada de decisão de um ferramental envolve aspectos econômicos e técnicos, os quais estão relacionados e não devem ser dissociados. Os aspectos econômicos estão relacionados aos custos incorridos na manufatura do ferramental e no processo de injeção. Os aspectos técnicos correspondem aos requisitos de projeto que causam impacto na usinagem do ferramental e na injeção da peça.

Na Figura 2 estão apresentados os custos incorridos na manufatura do molde. É importante observar que alguns destes custos apresentam diferenciação de valor, se o molde for fabricado em aço ou alumínio.

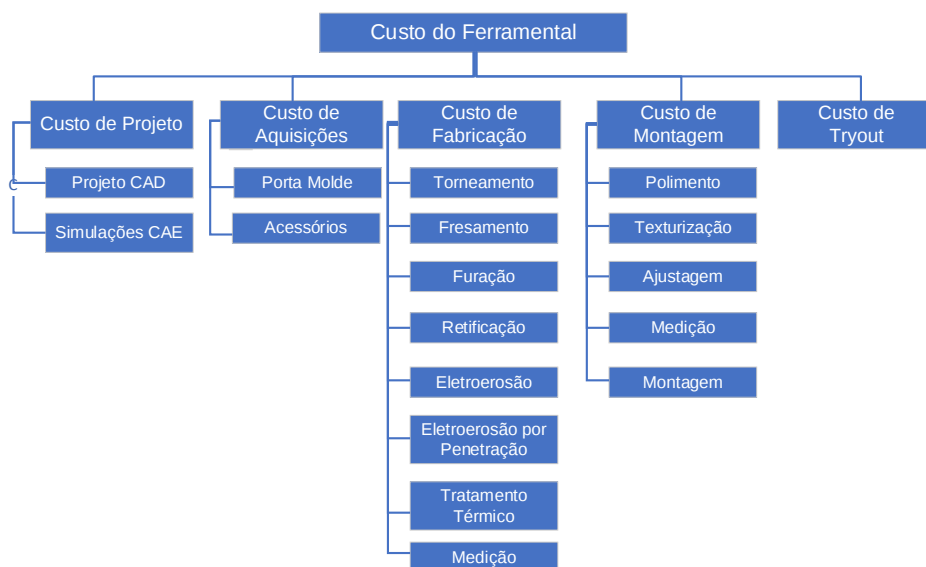


Figura 2. Desdobramento do custo de um ferramental.

A diferenciação do custo de aquisição é maior devido ao custo do porta-molde, enquanto os custos dos acessórios apresentam menor diferenciação. O custo de manufatura apresenta diferenciação com relação aos processos envolvidos na fabricação do molde, ou seja, nas etapas de torneamento, fresamento, furação, retificação, eletroerosão, tratamento térmico. Estes impactos estão associados a tempo de operações de usinagem, custo de ferramentas de usinagem, custos associados aos desgastes de máquinas e equipamentos.

Os custos associados a montagem também podem ser impactos, a depender do tipo de molde (aço ou alumínio), mas entende-se que este impacto dependerá do tipo de aplicação da peça (produto a ser injetado). De qualquer forma, a percepção que se tem este impacto é indiferente, quando associado aos custos totais de um ferramental. Da mesma forma, ocorre com o custo de try-out.

Para facilitar esta análise é apresentada uma comparação com base em alguns resultados disponíveis do projeto DEMALAP – Demonstrador de Molde em Alumínio para Alta Produção. No caso, estão sendo desenvolvidos, para a injeção da mesma peça, um molde em aço e um molde em alumínio, os quais estão representados na Figura 3. No molde de aço, ilustrado a esquerda, as placas cavidades são fabricadas em P20 (destacadas em verde) e as demais placas em 1045. No molde em alumínio, as placas cavidades são fabricadas em Alumínio 7075-T6 (destacadas em amarelo) e as demais em placas em 1045. Neste molde foram adicionadas sapatas para reforçar o molde quando da etapa de fechamento do mesmo na injetora.

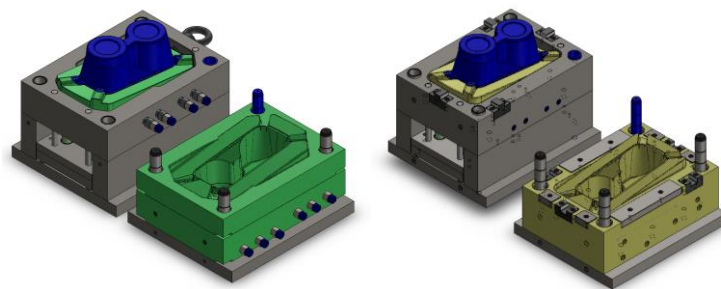


Figura 3. Molde de aço e alumínio desenvolvido no âmbito do projeto DEMALAP.

A Tabela 2 sintetiza os possíveis impactos do molde de aço em relação ao molde alumínio, considerando como exemplo o molde apresentado na Figura 3. A referência para a avaliação foi realizada considerando o molde de aço. Assim, por exemplo, o custo de fabricação torneamento é menor em relação ao P20.

Tabela 2. Impacto do custo no ferramental de aço e alumínio.

		Molde de Aço	Molde de Alumínio
Dimensões	Largura	296mm	296mm
	Comprimento	346mm	346mm
	Altura	341mm	350mm
Peso		201,65 Kg	156 Kg
Custo de Aquisição: porta-molde		(P20) R\$/litro: 157,00	(Al 7075 – T6) R\$/litro: 174,22.
Custo de Aquisição: acessório		Igual	Igual
Custo de Fabricação: torneamento, fresamento, furação, retificação, eletroerosão.		-	Menor, em função de poder operar com velocidades mais altas e causar menor desgastes nas máquinas. Além disto, o custo de ferramentas pode ser menor.
Custo de Fabricação: tratamento térmico		Maior ou menor, a depender do tipo de tratamento e molde.	
Custo de Fabricação: medição		Igual	
Custo de Montagem: polimento e texturização.		Maior ou menor, a depender do tipo de polimento ou texturização.	
Custo de Montagem: ajustagem, medição e montagem		Maior ou menor, a depender do tipo de molde. É importante levar em conta que o peso mais leve do molde de aço pode auxiliar a manipulação do molde. Por outro lado, a colocação de sapatas para reforçar o molde de alumínio pode impactar em um tempo maior de ajustagem e montagem do molde.	
Custo de Try-out		-	Maior em decorrência da falta de experiência dos recursos humanos em realizar try-out em moldes de alumínio.

Em termos técnicos, considerando os requisitos associados ao projeto, fabricação e injeção de peças plásticas é importante identificar os requisitos que apresentam impacto sobre o molde de alumínio em relação ao molde aço.

Para isto, foi consultada uma lista de requisitos de projeto de componentes de plásticos injetados (Ferreira, 2002), de projetos de moldes de injetados (Sacchelli, 2007), assim como, nos resultados de um workshop realizados por especialistas participante do DEMALAP. Na tabela 3, tem-se a lista dos requisitos técnicos que apresentam impacto se o molde for fabricado em alumínio ou em aço, portanto, devem ser considerados quando da tomada de decisão.

Tabela 3. Impacto do custo no ferramental de aço e alumínio.

Requisito	Unidade	Efeito sobre o molde de alumínio, em relação ao molde de aço
Dureza	HV	Menor ▼
Oxidação/resistência química	-	Menor ▼
Resistência ao impacto	J	Menor ▼
Perda de resistência com exposição prolongada/cíclica a temperatura	-	Maior ▲
Módulo de elasticidade	GPa	Menor ▼
Tensão de Escoamento	MPa	Menor ▼
Condutividade térmica	W/m.K	Maior ▲
Expansão térmica	mm/K	Maior ▲
Densidade	g/cm3	Menor ▼
Velocidade de Corte	mm/min	Maior ▲
Preço/quilograma	R\$/Kg	Maior ▲
Preço/volume	R\$/m3	Menor ▼

Os requisitos apresentados na Tabela 3 foram analisados em relação ao seu impacto nas etapas de projeto do molde, fabricação do molde e moldagem de injeção.

No caso da **etapa de projeto do molde**, foi observado que o fato da tensão de escoamento do alumínio ser menor que a tensão do escoamento do aço, irá requerer um custo de homem-hora maior em relação ao projeto de molde de aço, pois o CAE estrutural, geralmente, não é realizado em moldes de aço. Já no caso de molde de alumínio, a realização desta análise é importante devido a menor tensão de escoamento que irá requerer um maior custo com softwares específicos e maior tempo de simulação.

A mesma análise foi realizada com relação as **etapas de fabricação**, envolvendo os custos de materiais, tempo e custos de máquinas de usinagem, custos de ferramentas, tempo de eletroerosão, custo de eletroerosão, custos de recursos humanos e acabamento superficial. O resultado desta análise está apresentado na Tabela 4. Os símbolos apresentam, representam:

- (▲▲) O uso do alumínio apresenta **grande vantagem**;
- (▲) O uso do alumínio apresenta **vantagem**;
- (▼) O uso do alumínio apresenta **desvantagem**;
- (▼▼) O uso do alumínio apresenta **grande desvantagem**;

Tabela 4. Impacto dos requisitos de projeto na fabricação do ferramental.

Requisitos a serem considerados	Custos Materiais	Tempos Usinagem	Custos Máquinas Usinagem	Custo Ferramentas	Tempos EDM	Custo Máquina EDM	Custos HH	Acabamento / Revestimento Superficial
Dureza		▲▲	▲▲	▼▼			▲▲	▲▲
Oxidação/resistência química		▼▼		▼▼	Obs.1			▲▲
Resistência ao impacto		▲▲						
Perda de resistência com exposição prolongada / cíclica a temperatura								▲▲
Módulo de elasticidade								
Tensão de Escoamento								
Condutividade térmica		▲▲			▼▼			
Expansão térmica		▼▼						
Densidade		▲▲	▲				▲	
Velocidade de Corte		▲▲	▲▲	▲▲			▲▲	
Preço/quilograma	▼▼							
Preço/volume	▲▲							

Obs.1: Os resíduos de grafite e cobre podem afetar a qualidade da superfície;

A mesma análise foi realizada para o **processo de moldagem**, no qual foram considerados os custos de material, custo de máquinas, tempo de set-up do processo de injeção, tempo de injeção, tempo de pós-injeção, vida útil do molde e força de extração. O resultado desta análise está apresentado na Tabela 4. Os símbolos seguem a mesma representação.

Tabela 5. Impacto dos requisitos de projeto no processo de moldagem.

Diferenças entre Aço X Alumínio	Custos Materiais	Custos Máquinas	Tempos de Set-Up	Tempos de Injeção	Tempos Pós-Injeção	Vida Útil	Força de extração
Dureza						▼▼	
Oxidação/resistência química					▲		
Resistência ao impacto				▼		▼▼	
Perda de resistência com exposição prolongada/cíclica a temperatura						▼▼	
Módulo de elasticidade						▼▼	
Tensão de Escoamento						▼▼	
Condutividade térmica			▲	▲▲			▲
Expansão térmica						▼	
Densidade			▲	▲	▲		
Velocidade de Corte							
Preço/quilograma						▼▼	
Preço/volume							

Com as análises apresentadas na Figura 2, nas Tabelas 3 a 5, a equipe envolvida na fase de comercialização ou mesmo na solicitação de orçamento do molde pode aplicar uma matriz semelhante a Matriz de Pugh (Ferreira, 2002), que é uma

ferramenta para comparação de solução de projetos (conceitos), no qual é adotado um conceito de referência (molde de aço) e os demais (molde de alumínio) são avaliados em relação a estas referências. Para aplicar a Matriz de Pugh são executados os seguintes passos:

1. Listar os critérios de avaliação dos conceitos;
2. Escolher um produto/ serviço para ser a referência. No caso, o molde de aço;
3. Inserir os produtos/ serviços que serão comparados com o de referência. No caso, o molde de alumínio;
4. Para cada critério, comparar os conceitos com o de referência, utilizando a simbologia: (++) Muita vantagem sobre o conceito de referência; (+) Vantagem sobre o conceito de referência; (–) Desvantagem sobre o conceito de referência; (– –) Muita desvantagem sobre o conceito de referência; e, (|) Equivalente ao conceito de referência
5. Somar os “+” e “–” de cada conceito para verificar qual possui mais valor;

Um aspecto fundamental neste processo de avaliação é que não se tem muitas informações do projeto do molde, pois a tomada de decisão ocorre na fase negocial. Geralmente, tem-se um modelo 3D da componente a ser injetada, a quantidade de peças a ser injetadas, tipo de material a ser injetado e especificações técnicas do produto. Desta forma, os métodos de tomada de decisão devem ser vistos como métodos de apoio ao processo decisório.

Para auxiliar a equipe envolvida na fase negocial a selecionar se o molde poderá ser realizado em aço ou alumínio é proposta a utilização de uma ferramenta que incorpora algumas etapas do Método AHP e do MACBETH, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Matriz de apoio a seleção do molde de aço ou alumínio.

[illegible]

Assim, está sendo proposta a utilização da Matriz representada na Tabela 6, cujo desenvolvimento envolve as seguintes etapas:

1. Definir os custos considerados na avaliação – Foram levados em conta os custos listados na Figura 2. É importante salientar que podem ser incluídos ou excluídos alguns custos, conforme o escopo do projeto;
2. Identificar os níveis de atratividade (N1 a N5) para um dos critérios – Foram considerados 05 (cinco) níveis de atratividade. Os valores apresentados nos níveis de atratividade são uma referência, podendo ser adequados conforme o interesse;
3. Estimar o percentual do custo de projeto, aquisição, fabricação, montagem e tryout em relação ao custo total do molde – Este valor pode variar de projeto para projeto (por exemplo, em função do tamanho do molde e complexidade do molde) ou ferramentaria para ferramentaria (por exemplo, em função do tipo de equipamento e como está organizada). De qualquer forma, estes valores são uma estimativa, pois estamos na fase negocial do desenvolvimento do ferramental. Esta informação deve ser preenchida na célula azul;
4. Escolher um produto para ser a referência – No caso, considerando o projeto da peça a ser injetada, o produto de referência é o molde de aço;
5. Caracterizar o molde de aço – Com o objetivo de identificar as suas características principais e ter uma referência mais assertiva para o orçamento;
6. Caracterizar o molde de alumínio – Visando levantar as suas características principais para ser uma estimativa / análise de custo mais assertiva;
7. Para cada critério, comparar utilizando os níveis de atratividade (N1 a N5) – A comparação deve ser realizada do molde de alumínio em relação ao molde de aço. Para isto, as análises apresentadas nas tabelas 3, 4 e 5 devem ser consideradas e servem de orientação. A equipe deve preencher a célula verde;
8. Calcular o valor de desempenho do molde de alumínio – Multiplicar os percentuais de cada custo pelo resultado da avaliação de cada critério e realizar a soma ao final. Este valor deve ser preenchido na célula em amarelo. Se o valor da soma der maior que 0 (zero) indica que o molde de alumínio será mais oneroso que o custo do molde de aço. Se for menor do que 0 (zero) indica que o molde de alumínio é mais barato em relação ao molde de aço.

É importante salientar que o valor de desempenho não é um valor de custo, mas uma indicação se o custo do molde de alumínio será maior do que o custo do molde de aço. Um aspecto não considerado nesta avaliação são os impactos no custo do processo decorrentes do processo de injeção. Assim, estes valores devem ser considerados na decisão final do tipo de molde a ser empregado.

3. CONCLUSÕES

Baseado nos princípios de escolhas orientadas apresentados por (Gomes e Gomes, 2019) e considerando o escopo deste artigo, as discussões em torno da escolha do molde de aço ou alumínio devem procurar prever as consequências (inevitáveis) do processo decisório. Também o método busca uma reflexão a respeito das influências culturais (por exemplo, não se tem a cultura do uso de moldes de alumínio para injetar peças plásticas), observando o modo como elas interferem nas escolhas e decidindo quais costumes ou práticas devem ser seguidos.

O método proposto incorpora elementos das Escolas Americana e Europeia de tomada de decisão. No caso da Escola Americana combina elementos de análise hierárquica do método Analytic Hierarchy Process (AHP) e ao mesmo tempo uma análise par a par da escola. E, no caso da Escola Europeia utiliza a análise par a par do método MACBETH.

Um outro aspecto envolve a matriz de apoio a seleção de molde de aço ou alumínio, representada na tabela 6, no qual a análise hierárquica dos requisitos associados ao projeto, material, fabricação, montagem e try-out, podem ser definidos, conforme o problema de tomada de decisão. Da mesma forma, os níveis de atratividade (N1 a N5) também podem ser definidos, conforme os níveis de custos da empresa envolvida na tomada de decisão. Assim, pode deixar mais ou menos sensível a variação de custos.

Em suma, o método proposto tem por princípio a flexibilidade e a possibilidade de aprender com a experiência humana, permitindo a inserção de novos critérios, assim como mudando os níveis de atratividade.

Além dito, em uma segunda etapa, buscar-se-á incorporar mais informações na ferramenta (matriz representada na Figura 6) em decorrência dos avanços do projeto DEMALAP, uma vez que ter-se-ão disponíveis todos os parâmetros de tempo e custo associados ao projeto do molde de aço e alumínio. Com isto, será possível comparar os resultados da ferramenta proposta com os obtidos na prática.

4. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é um resultado parcial do Projeto DEMALAP - Demonstrador de Molde em Alumínio para Alta Produção patrocinado pelo Programa Rota 2030 do Governo Federal descrito na lei No. 13.755/2018 e é coordenado pela FUNDEP. Os executores do projeto são as universidades SENAI CIMATEC, UFBA e UFSC. Nós agradecemos aos outros parceiros do projeto pelo suporte prestado: ESSS Engineering Simulation and Scientific Software Ltda.; Ford Motor Company Brasil Ltda., Moldit Brasil Ltda.; Open Mind Tecnologia Brasil Ltda.; Renault do Brasil S.A.; SMRC

Fabricação e Comércio de Produtos Automotivos do Brasil Ltda. e Union Indústria de Moldes e Comércio Atacadista de Máquinas Eireli.

5. REFERÊNCIAS

- Alves, J. R. X.; Alves, J. M. Selection of best location for industrial installation using analytic hierarchy process (AHP). *Producao*, v. 25, n. 1, p. 13–26, 2015.
- Bana E Costa, C. A.; De Corte, J. M. J.; Vansnick, J. C. Macbeth. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, v. 11, 2012.
- Bana, C. A.; Chagas, M. P. A career choice problem An example of how to use MACBETH to build a quantitative value model based on qualitative.pdf. *Working Paper LSEOR*, n. 0, p. 1–16, 2002.
- Ferreira, C.V. Metodologia para as fases de projeto informacional e conceitual de componentes de plástico injetados integrando os processos de projeto e estimativa de custos. Tese. UFSC. 2002.
- Gomes, C.F.S. Modelagem Analítica Aplicada a Negociação e Decisão em Grupo. *Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro. V.26. n. 3. P 537-566. Dez. 2006.
- Gomes, L.F.A.M.; Gomes, C.F.S. Princípios e Métodos para a Tomada de Decisão. Enfoque Multicritério. 6ª Edição. Editora Atlas. 2019.
- Hansen, C. T.; Andreasen, M. M. A Mapping Of Design Decision-Making. *DS 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*, p. 1409–1418, 2004.
- Honkala, S.; Hämäläinen, M.; Salonen, M. Comparison of Four Existing Concept Selection Methods. *DS 42: Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design, Paris, France, 28.-31.07.2007*, p. 125- 126 (exec. Summ.), full paper no. DS42_P_317, 2007.
- HONKALA, S.; HÄMÄLÄINEN, M.; SALONEN, M. Comparison of Four Existing Concept Selection Methods. *DS 42: Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design, Paris, France, 28.-31.07.2007*, p. 125- 126 (exec. Summ.), full paper no. DS42_P_317, 2007.
- Ionica, A. C.; Leba, M. QFD Integrated in New Product Development - Biometric Identification System Case Study. *Procedia Economics and Finance*, v. 23, p. 986–991, 1 jan. 2015.
- Jansen, L. K. C.; Shimizu, T.; Jansen, J. U. Uma análise de investimentos considerando fatores intangíveis. *Revista Produção Online*, v. 4, n. 4, 10 ago. 2004.
- Jansen, L. K. C.; Shimizu, T.; Jansen, J. U. Uma análise de investimentos considerando fatores intangíveis. *Revista Produção Online*, v. 4, n. 4, 10 ago. 2004.
- Klein, J. S. M. et al. Product Modelling for Design Alternatives Selection Using Optimisation and Robustness Analysis. *Guidelines for a Decision Support Method Adapted to NPD Processes*, 2007.
- Liberatore, M. J.; Nydick, R. L. Group decision making in higher education using the analytic hierarchy process. *Research in Higher Education*, v. 38, n. 5, p. 593–614, 1997.
- Marcot, B. G.; Penman, T. D. Advances in Bayesian network modelling: Integration of modelling technologies. *Environmental Modelling & Software*, v. 111, p. 386–393, 1 jan. 2019.
- Mota, C. M. D. M.; De Almeida, A. T. Método multicritério ELECTRE IV-H para priorizaç ão de atividades em projetos. *Pesquisa Operacional*, v. 27, n. 2, p. 247–269, 2007.
- Muller, R. M.; Spiliopoulou, M.; Lenz, H.-J. Electronic Marketplaces of Knowledge: Characteristics and Sharing of Knowledge Assets. *Proceedings of the International Conference on Advances in Infrastructure for e-Business, e-Education and e-Medicine on the Internet*, n. July 2013, p. 1–12, 2002.
- Neiva, S. B.; Gomes, L. F. A. M. A aplicação da teoria da utilidade multiatributo à escolha de um software de e-procurement. *Revista Tecnologia*, v. 28, n. 2, p. 160–171, 2007.
- Norris, G. A; Marshall, H. E. Multiattribute Decision Analysis Method for Evaluating Buildings and Building Systems. *NIST Office of Applied Economics*, p. 1–82, 1995.
- Oliveira, A. S.; Sampaio, R. R. (Orientador); Ferreira, C. V. (Coorientador). Proposta de modelo em redes bayesianas para apoio à tomada de decisão visando produtos sustentáveis. Salvador: Centro Universitário SENAI CIMATEC, 5 mar. 2021.
- Peças, P. et al. Life Cycle Engineering - Taxonomy and State-of-the-Art. *Procedia CIRP*, v. 48, p. 73–78, 2016.
- Peter, C.; Swilling, M. Linking complexity and sustainability theories: Implications for modeling sustainability transitions. *Sustainability (Switzerland)*, v. 6, n. 3, p. 1594–1622, 2014.
- Rangel, L. A. D.; Gomes, L. F. A. M. Multicriteria Decision Aid in the evaluation of candidates. *Production*, v. 20, n. 1, p. 92–101, 2010.
- Sacchelli, C. M. Sistematização do processo de desenvolvimento integrado de moldes de injeção de termoplástico. Tese. UFSC. 2007.
- Salomon, V.; Montevechi, J.; Pamplona, E. Justificativa Para Aplicação Do Método De Análise Hierarquica. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1999_A0034.PDF>.
- Sandiford, J. G. Efficient and scalable exact inference algorithms for Bayesian networks. 2012.

Spetzler, C.; Winter, H.; Meyer, J. Decision Quality Value Creation from Better Business Decisions. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2016.

Vilas, C. Análise da Aplicação de Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão (MMAD) na Gestão de Recursos Hídricos. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/rehi/simposio/go/An%0Aalise da Aplicacao de Metodos Multicriterios de Apoio a Decisao na %0AGestao de Recursos Hidricos.pdf](http://www.cprm.gov.br/rehi/simposio/go/An%0Aalise%20da%20Aplicacao%20de%20Metodos%20Multicriterios%20de%20Apoio%20a%20Decisao%20na%20Gestao%20de%20Recursos%20Hidricos.pdf)>. Acesso em: 2 ago. 2008.

Vilas, C. Análise da Aplicação de Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão (MMAD) na Gestão de Recursos Hídricos.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

DECISION SUPPORT MODEL FOR STEEL OR ALUMINUM MOLD SELECTION FOR POLYMER INJECTION

Cristiano Vasconcellos Ferreira

Xisto Lucas Travassos Junior

Higor Luiz Coelho Olenka

Luiz Miguel Sergiani Costa

Universidade Federal de Santa Catarina – Rua Dona Francisca – 8300 – Joinville - SC

cristiano.v.ferreira@ufsc.br, lucas.travassos@ufsc.br, cirleicc1705@gmail.com, higor14luiz@gmail.com, filipejesol@gmail.com

Valter Estevão Beal

Centro Universitário SENAI CIMATEC – Avenida Orlando Gomes, 1845 – Piatã – Salvador – BA

valtereb@fieb.org.br

Armando Sá Ribeiro Junior

Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Rua Prof. Aristides Novis, 02 – Federação – Salvador – BA

asrj@ufba.br

Abstract: Plastic injected parts have become consolidated as the type of components most present in industrial products. The main challenges faced by the industry in the use of injection molding in terms of productivity are related to mold manufacturing time and injection cycle time. Molds are traditionally made of steel. To overcome this problem, molds made of aluminum alloys, which have four times the thermal conductivity of steel, can be used. On the other hand, there are significant technological challenges in using aluminum molds for injection of plastic parts, including issues with mold design, injection process simulation, mold manufacturing, and try-out. At the same time, the use of an aluminum mold necessitates an economic analysis because, while the mold material is more expensive than steel, the injection process gains productivity. In other words, the decision to select steel or aluminum molds involves technical and economical aspects. Decision making related to uncertainty assessment and management is becoming increasingly important in various scientific fields. The presence of uncertainty, the evaluation of alternative scenarios, the existence of quantitative variables as well as subjective information, the interdependence of variables, different dimensions, and the presence of non-deterministic variables all play a role in the selection of the type of material used in polymer injection molds. The objective of this paper is to present a decision support model for the selection of the material, steel or aluminum, to be used in the development of polymer injection molds. This model was built using some partial results from the DEMALAP project, which was developed under the Rota 2030 Program to demonstrate the feasibility of using aluminum alloys as a base material for the manufacture of injection molds focused on high productivity, with the goal of increasing global competitiveness throughout the life cycle of the injected thermoplastic part.

Key-words: Decision Making, Steel Mold, Aluminum Mold, Requirements, Cost