

Seleção de projetos de conformação mecânica em ferramental de estampo por meio de métodos de análise multicritério de apoio à decisão

Lucas de Castro Cicuto, Andrei Strickler, Ricardo Vinicius Bubna Biscaia, Luis Fernando Paulista Cotian, Álamo Alexandre da Silva Batista

Resumo: Em um projeto mecânico engenheiros e projetistas se deparam com a necessidade de tomadas de decisão relacionadas a seleção de projetos adequados, com análise de diversas variáveis como custo, qualidade, produtividade entre outras. Desta maneira, o presente trabalho tem o objetivo de propor um modelo de ranqueamento de soluções possíveis em um projeto de conformação mecânica. Para esta seleção é inicialmente realizada uma análise de fragilidades e falhas para selecionar critérios. Na sequência são especificadas alternativas viáveis para um determinado projeto mecânico. O método de entropia agregado ao método *Direct Rating Method* são utilizados para o ponderamento dos critérios. O método TOPSIS ordena alternativas de solução para projetos mecânicos. O modelo proposto é aplicado em um ferramental de estampo na linha de produção do corpo de rolamento axial de assento plano, conforme estudo de caso em uma empresa do setor de autopeças. Como resultado da aplicação do método, verifica-se que foram ordenadas as alternativas que satisfazem as necessidades dos decisores. Verifica-se que o modelo proposto, pode ser adaptado para aplicação em diversos projetos mecânicos que demandam a análise de critérios.

Palavras chave: Projeto mecânico; Ferramental de estampo; Método de entropia; Direct Rating method; TOPSIS modificado.

Selection of mechanical forming projects in mold tools by multi-criteria decision analysis support methods

Abstract: In a mechanical project engineers and designers are faced with the need for decision-making related to the selection of suitable projects, with analysis of several variables such as cost, quality, productivity and others. In this way, the present paper has the objective of proposing a model of ranking of possible solutions in a mechanical conformation project. For this selection, an analysis of failure modes and effects is initially performed to select criteria. In the sequence, feasible alternatives are specified for a given mechanical design. The method of entropy aggregated to the Direct Rating method is used to weigh the criteria. The TOPSIS method orders solution alternatives for mechanical designs. The proposed model is applied in a stamping tool in the production line of the flat seat axial bearing body, according to the case study of a company in the auto parts sector. As a result of the application of the method, it is verified that the alternatives that meet the needs of the decision makers were ordered. It is verified that the proposed model can be adapted for application in several mechanical projects that require the analysis of criteria.

Key-words: Mechanical design; FMEA; Stamping tool; Method of entropy; Direct Rating method; Modified TOPSIS.

1. Introdução

Os processos de conformação mecânica são recorrentes no meio industrial onde o metal é solicitado mecanicamente, alterando permanentemente suas dimensões e propriedades mecânicas. Segundo Schneider e Hartmann (2013), esse processo pode resultar em elementos

ou produtos de alta qualidade em relação a tolerância geométrica, acabamento, alta produtividade, baixo custo e demonstra a importância na economia brasileira.

Diante da globalização, as empresas buscam altos níveis de confiabilidade e disponibilidade em seu ferramental de estampo, mantendo os custos de produção aceitáveis para o mercado. Considerando essa tendência, Ferrarini (2004) mostra a relevância da qualidade da matéria prima para processos de fabricação de produtos estampados, onde o controle das chapas metálicas certifica a qualidade do produto final e níveis baixos de material refugado.

O processo de estampo ou também denominado embutimento profundo ou repuxo, utiliza um ferramental que transforma uma geratriz plana em um produto ou componente, através de esforços de compressão ou tração, ocorrendo deformação plástica do metal. Os esforços de compressão são provenientes da utilização de prensas. Chiaverini (1986) a define como máquinas utilizadas na conformação e corte de materiais diversos, que possibilitam a realização de vários ciclos, originando um processo produtivo. Um exemplo de equipamento, produzido através de uma linha de produção de estamparia é o macaco mecânico utilizado em veículos automotores. O CONTRAN na Resolução Nº 14/98 estabelece como obrigatório o uso do macaco, compatível com o peso e carga do veículo.

Portanto percebe-se a importância do estabelecimento adequado das variáveis de projeto de fabricação destes componentes mecânicos, visto a aplicabilidade no setor automotivo e em demais setores que utilizam os projetos da indústria metal mecânica.

Os autores Budynas e Nisbett (2011) mostram que um material metálico quando submetido a condições cíclicas podem desenvolver falha por fadiga e enfatizam, o perigo e complexidade da mesma. Ainda, ressaltam que análises mais cuidadosas verificam que os limites de resistência à fadiga estão abaixo do necessário para o projeto mecânico, como um mal dimensionamento dos componentes ou escolha equivocada do material.

Kalpakjian e Schmid (2010) relatam que máquinas e ferramentas são comumente selecionadas pela avaliação de critérios qualitativos e quantitativos, como a potência, capacidade de trabalho, resistência dos materiais, custos, entre outros. Estes critérios são quase que em sua totalidade definidos pelo cliente e requisitos do projeto e os projetistas devem tomar as decisões corretas.

Budynas e Nisbett (2011) exemplificam 26 itens e relatam que cada projeto terá sua priorização e suas inter-relacionalidades, originando múltiplas alternativas para o mesmo projeto. Como projetos são definidos por múltiplos critérios, ferramentas de Apoio à Decisão (MCDA) podem ser utilizadas no embasamento técnico para a efetiva tomada de decisão nas escolhas do projeto. Desta maneira é evidenciado a importância de um método que auxilie na elaboração do projeto mecânico, que envolva múltiplos critérios e múltiplas alternativas de solução.

Quando critérios conflitantes são posicionados na seleção de um determinado projeto, como por exemplo, redução do custo e aumento da resistência, verifica-se que a análise de importância dos critérios conflitantes, bem como a seleção da alternativa em que oferece as melhores condições para quem toma as decisões, devem ser amparadas por técnicas que apoiem a tomada desta decisão. A escolha de critérios relevantes baseados no histórico de falhas de projetos anteriores, auxilia a diminuição dos impactos negativos na confiabilidade e disponibilidade de novas alternativas de projetos, entretanto, quando ignorados levam ao insucesso e despesas excedentes do projeto.

Tendo em vista a complexidade de um projeto mecânico, demonstrado por Budynas e Nisbett (2011), que tratam o projeto mecânico como um empreendimento complexo, com múltiplas alternativas de soluções, devido as prioridades e suas inter-relacionalidades. O desenvolvimento de uma ferramenta matemática e computacional para o apoio da avaliação subjetiva de um número de alternativas de decisão sob um número finito de critérios de desempenho se torna conveniente para projetos de conformação mecânica relatado por Lootsma (1999). O autor lembra sobre a dificuldade de tomada de decisão por organizações industriais e como também em pequenas organizações. Onde, existe um DM (*Decision Maker*) ou um grupo responsável por fazer escolhas a partir de um número de alternativas. O tomador de decisão tem a tarefa de julgar o desempenho das alternativas em questão sob cada critério e ponderar a importância relativa dos critérios, a fim de chegar a um julgamento global.

Entre os diversos métodos de auxílio à tomada de decisão, Hwang e Yoon (1981) propõem que o método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), chega em alternativas de solução com a menor e maior distância entre a solução ideal. A alternativa de menor distância maximiza os benefícios e minimiza as perdas, por outro lado, a solução de maior distância o maximiza as perdas e minimiza os ganhos. O método proporcionando um ranking de alternativas. Segundo Behzadian et al. (2012) a engenharia é uma área com ampla utilização do método TOPSIS. Inclui sistemas de manufatura modernos, automação, engenharia de materiais, mecatrônica, design de produto e engenharia de qualidade.

Lin et al. (2008) apresentam uma estrutura integrada entre o processo de hierarquia analítica (AHP) e a técnica de preferência de ordem por similaridade à solução ideal (TOPSIS). Os autores buscaram auxiliar projetistas na identificação dos requisitos do cliente e características de projeto. A proposta foi positiva, os projetistas foram capacitados a considerar sistematicamente as informações relevantes do projeto e determinar efetivamente os principais objetivos do projeto e as alternativas.

Behzadian et al. (2012) relata que desde o ano de 2000 até sua pesquisa o número de publicações que utilizam o método TOPSIS na área de "*Design, Engineering and Manufacturing Systems*" era de 64 artigos. E na revisão geral sobre aplicações e metodologias foram encontrados 266 artigos em 103 jornais.

Tzeng e Huang (2011) relatam que os critérios têm significância e significados diferentes, para um projeto e que não se pode supor que cada critério de avaliação tenha a mesma importância. Há muitos métodos de ponderamento que podem ser empregados para determinar pesos, sendo eles, autovetor, método de mínimos quadrados ponderados, método de entropia, processo de hierarquia analítica (AHP) e técnica de programação linear para análise multidimensional de preferência (LINMAP) e outros.

Os critérios são de natureza quantitativa, Zeleny (1976) desenvolveu o método de entropia, que depende apenas da variabilidade dos valores no estabelecimento dos pesos. O método é uma medida da incerteza da informação.

Direct Rating Method descrito por Nijkamp et al. (1990) é uma técnica de classificação. Obtém-se as pontuações por estimativa direta dos pesos dos critérios através de questionário realizado com um tomador de decisão, para representar a importância de cada critério de forma subjetiva. Os pesos subjetivos indicam a importância, sendo 1 a importância menor e 10 a importância maior. O autor também relata a importância da troca de informações sobre dados subjetivos entre pesquisador e tomador de decisão para que possam refletir melhor suas opiniões em casos resultados distantes dos esperados.

Zeleny (1976) relata sobre a importância da agregação de pesos. Este método traz vantagem sobre ponderações primárias, pois os atributos selecionados tornam-se indiferenciados em termos de sua importância. As pontuações são então atribuídas e avaliadas em relação a um determinado conjunto de alternativas. É estabelecido e uma ponderação secundária. Alguns atributos originalmente de menor importância podem ser ponderados com uma alta importância ou de maior importância serem atribuídos com uma menor importância.

A escolha da melhor alternativa de projeto se faz necessária com a atual situação do mercado do setor produtivo de peças estampadas, que levam os engenheiros a buscar soluções inovadoras, que apresentam alta confiabilidade e disponibilidade e são desafiados por um cenário de critérios conflitantes. A metodologia de multicritério apresentada neste trabalho, demonstra ferramentas de apoio para seleção de critérios, relevantes as necessidades do decisor, ponderamento de critérios e apoio para tomada de decisão, propondo um ranking de alternativas de solução de projeto de ferramental de corte e conformação.

3. Materiais e Métodos

O presente trabalho busca propor um método para obter um ranking de soluções para projetos mecânicos de ferramentas de estampas, seguindo a sequência proposta, que está esquematizada no fluxograma da Figura 2.

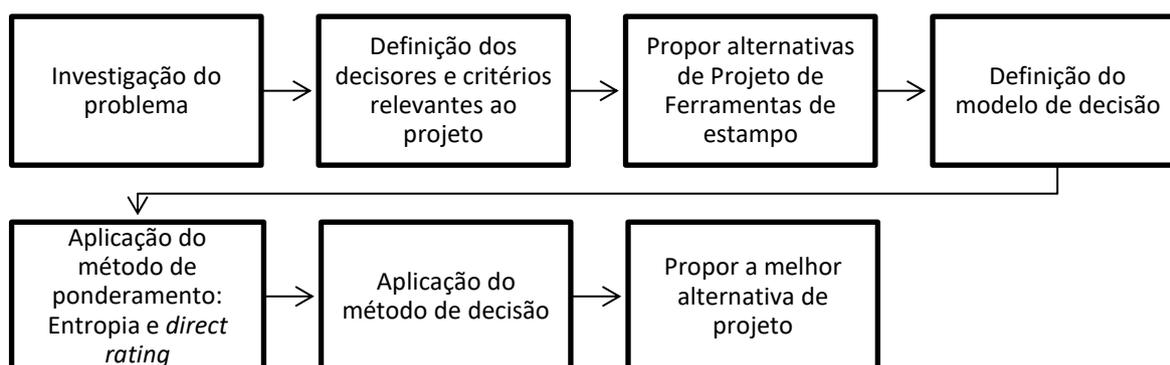


Figura 1 – Sequência do método proposto

4. Estudo de Caso

Com a disponibilização do estudo de caso pela empresa Lwacc do Brasil é possível aplicar a metodologia proposta neste trabalho, em busca de propostas de soluções para o projetos de melhoria do ferramental de anel externo de rolamento axial de assento plano, elemento essencial na produção do macaco mecânico.

4.1 Rolamento axial

O rolamento axial é um dos elementos de um macaco mecânico de automóvel, ele permite a rotação do elemento roscado de potência. A rotação provocada por força externa, transforma torque em força vertical, possibilitando levantamento do carro.

Os rolamentos axiais de esferas são classificados segundo as características do assento do anel externo, em assento plano e assento esférico. Estes rolamentos podem suportar cargas axiais, mas não as cargas radiais. As especificações geométricas do rolamento axial de esferas de assento plano, são fornecidas por Lwacc do Brasil, contidas na Tabela 1.

Valores de entrada	-
Diâmetro do furo (interno)	12 mm
Diâmetro do anel (externo)	28 mm
Espessura da chapa	3,57 mm
Limite de resistência à tração	420 MPa
Tensão de escoamento do material	350 MPa

Tabela 1 – Dados do corpo do rolamento axial

O rolamento é constituído por 2 anéis externos de assento plano; 1 elemento de separação das esferas de polietileno de alta densidade; 8 esferas. O material empregado no anel externo é Aço SAE 1020, tratados termicamente por cementação. O separador de esfera e as esferas são obtidos de terceiros e são montadas pela fábrica.

A montagem é realizada já no produto final, macaco mecânico, onde o rolamento é montado com a seguinte configuração: anel; conjunto separador de esferas e esferas; anel.

5. Resultados e Discussões

Aqui estão os métodos de análise de falhas e de tomada de decisão, realizados em sequência para determinação da melhor alternativa de projeto de um sistema de fabricação de rolamentos.

5.1 Definição dos Critérios Relevantes

Os itens Punção e Matriz interna mais a matriz externa apresentam maior risco para o sistema, estes serão objeto de análise e revisão de projeto. A partir das causas potenciais descritas no FMEA é possível a eleição de critérios relevantes para o estudo, sendo elencado os itens de maior risco, sendo eles:

a) Material:

Causas potenciais que indicam que o material escolhido é incorreto, demonstra a necessidade da eleição de propriedades mecânicas mais adequadas ao projeto. Villares Metals (2014) disponibilizou em seu catálogo um diagrama em barras de critérios importantes para ferramentas de trabalho a frio, sendo elas resistência ao desgaste e tenacidade que são tomados como critérios C1 e C2 respectivamente, para estudo deste trabalho. Porém, nem todos materiais demonstrados na Figura 3, são adequados para aplicação ou não possuem disponibilidade de compra para a empresa estudada. Assim, três materiais são propostos, pois são recomendadas no catálogo para a aplicabilidade de trabalho a frio e mais um material, usado na empresa Lwacc do Brasil, é incluído na análise. Sendo eles: VD2 - AISI D2, VF800ATIM, VND - AISI O1 e VC131 - AISI D6.

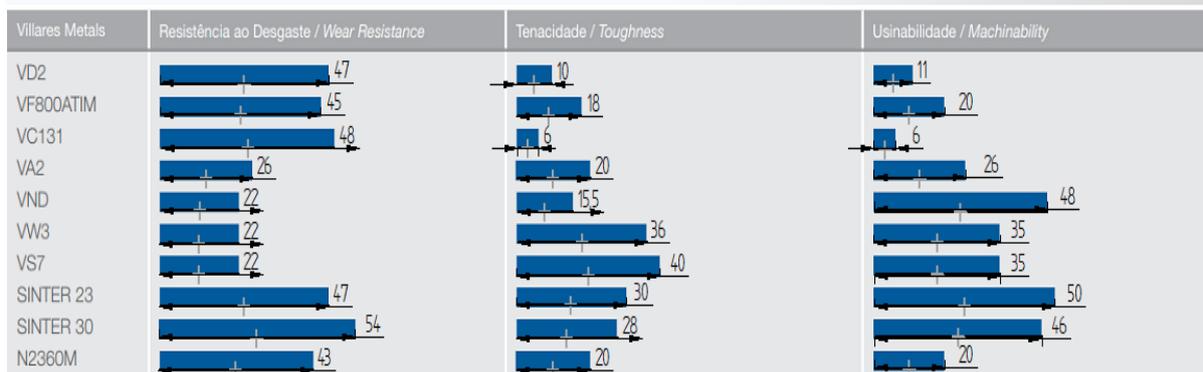


Figura 2 – Propriedades dos aços. Adaptado de Villares Metals (2014 p. 4)

b) Usinagem:

Outra causa potencial que tem relação com a escolha do material é usinagem inadequada. Com o critério usinabilidade (C3) do material disponível na Figura 7, é possível obter alternativas que proporcionem melhor qualidade da ferramenta. A Figura 7 ilustra a modificação do projeto geométrico. O primeiro item, representa o projeto 1 (atual) e o segundo item o projeto 2 (redimensionado).

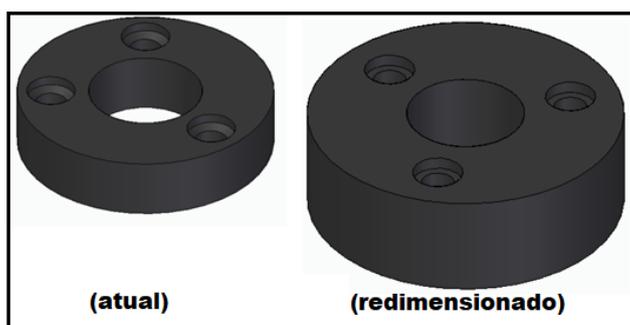


Figura 3 – Projeto 1 (atual), Projeto 2 (redimensionado)

c) Tratamento térmico

Atualmente o tratamento térmico das ferramentas pode ser realizado no próprio empreendimento, de forma econômica ou por um terceiro especializado. Foi tratado como critério C4 o local da execução do tratamento térmico. O decisor avalia que terá 50% de ganhos em número de peças produzidas antes da falha da ferramenta, quando o tratamento térmico é feito por um especialista.

d) Dimensionamento de projeto

Com a análise do projeto é verificada a possibilidade de redimensionamento da matriz de corte externo, buscando um projeto mais robusto. Comparando-se os dois projetos, o decisor indica inicialmente o desempenho subjetivo, de acordo com sua experiência, e será tratado como critério C5.

Para cada critério levantado, existe um custo associado. Para o decisor, o custo é um critério relevante na decisão de alternativas de projeto e foi tratado como critério C5 para o punção e matriz interna e C6 para a matriz externa.

Portanto, para tomada de decisão, foram consideradas a seleção de material e tratamento térmico com o custo associado da alternativa. Assim foi possível gerar alternativas demonstradas na Tabela 2. A mudança de geometria não se aplica para estes componentes

do ferramental pois inviabilizaria a produção do anel externo do rolamento axial de assento plano.

-	Material	Tratamento térmico	Custo (R\$)
Alternativa 1	VD2 - AISI D2	Interno	129,00
Alternativa 2	VD2 - AISI D2	Terceirização	219,00
Alternativa 3	VF800ATIM	Interno	143,38
Alternativa 4	VF800ATIM	Terceirização	233,38
Alternativa 5	VND - AISI O1	Interno	120,50
Alternativa 6	VND - AISI O1	Terceirização	210,50
Alternativa 7	VC131 - AISI D6	Interno	127,50
Alternativa 8	VC131 - AISI D6	Terceirização	217,50

Fonte: autoria própria (2019)

Tabela 2 – Modelo de alternativas para punção e matriz interna

Para o projeto da matriz interna é associado o projeto de redimensionamento como possibilidade de combinação de alternativa. Assim, as combinações de alternativas propostas ficam descritas conforme Tabela 3.

-	Material	Tratamento térmico	Projeto geométrico	Custo (R\$)
Alternativa 1	VD2 - AISI D2	Interno	Projeto 2	259,00
Alternativa 2	VD2 - AISI D2	Interno	Projeto 1	129,00
Alternativa 3	VD2 - AISI D2	Terceirização	Projeto 2	349,00
Alternativa 4	VD2 - AISI D2	Terceirização	Projeto 1	219,00
Alternativa 5	VF800ATIM	Interno	Projeto 2	273,38
Alternativa 6	VF800ATIM	Interno	Projeto 1	143,38
Alternativa 7	VF800ATIM	Terceirização	Projeto 2	363,38
Alternativa 8	VF800ATIM	Terceirização	Projeto 1	233,38
Alternativa 9	VND - AISI O1	Interno	Projeto 2	250,50
Alternativa 10	VND - AISI O1	Interno	Projeto 1	120,50
Alternativa 11	VND - AISI O1	Terceirização	Projeto 2	340,50
Alternativa 12	VND - AISI O1	Terceirização	Projeto 1	210,50
Alternativa 13	VC131 - AISI D6	Interno	Projeto 2	257,50
Alternativa 14	VC131 - AISI D6	Interno	Projeto 1	127,50
Alternativa 15	VC131 - AISI D6	Terceirização	Projeto 2	347,50
Alternativa 16	VC131 - AISI D6	Terceirização	Projeto 1	217,50

Fonte: autoria própria (2019)

Tabela 3 – Modelo de alternativas para matriz externa

5.2 Modelos de Decisão

Os modelos de decisão montados nas Tabelas 4 e 5 trazem um conjunto de alternativas, critérios e os respectivos desempenhos de cada alternativa. Sendo que na Tabela 4 está descrito o modelo para seleção do punção e a matriz interna.

Custo/benefício	+	+	+	+	-
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
	Resistência ao desgaste	Tenacidade	Usinabilidade	Tratamento térmico	Custo (R\$)
Alternativa 1	47	10	11	1	129,00
Alternativa 2	47	10	11	1,5	219,00
Alternativa 3	26	20	26	1	143,38
Alternativa 4	26	20	26	1,5	233,38
Alternativa 5	22	15,5	48	1	120,50

Alternativa 6	22	15,5	48	1,5	210,50
Alternativa 7	48	6	6	1	127,50
Alternativa 8	48	6	6	1,5	217,50

Fonte: Autoria Própria (2019)

Tabela 4 – Modelo de decisão – punção e matriz interna

A Tabela 5 demonstra o modelo de decisão para matriz externa.

Custo/benéfico	+	+	+	+	+	-
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
	Resistência ao desgaste	Tenacidade	Usinabilidade	Tratamento térmico	Geometria	Custo (R\$)
Alternativa 1	47	10	11	1	3	259,00
Alternativa 2	47	10	11	1	8	129,00
Alternativa 3	47	10	11	1,5	3	349,00
Alternativa 4	47	10	11	1,5	8	219,00
Alternativa 5	45	18	20	1	3	273,38
Alternativa 6	45	18	20	1	8	143,38
Alternativa 7	45	18	20	1,5	3	363,38
Alternativa 8	45	18	20	1,5	8	233,38
Alternativa 9	22	15,5	48	1	3	250,50
Alternativa 10	22	15,5	48	1	8	120,50
Alternativa 11	22	15,5	48	1,5	3	340,50
Alternativa 12	22	15,5	48	1,5	8	210,50
Alternativa 13	48	6	6	1	3	257,50
Alternativa 14	48	6	6	1	8	127,50
Alternativa 15	48	6	6	1,5	3	347,50
Alternativa 16	48	6	6	1,5	8	217,50

Fonte: Autoria Própria (2019)

Tabela 5 – Modelo de decisão – matriz externa

5.3 Aplicação dos Métodos de Ponderamento: *Direct Rating* e Entropia

O método *direct rating* foi realizado com base no que foi proposto por Nijkamp et al. (1990). Já o método de ponderamento objetivo de entropia Zeleny (1976). Ambos foram agregados e obtidos para os dois modelos de decisão conforme especificado nas Tabelas 6 e 7.

Critério	Importância (z)	Pesos normalizados	Pesos Normalizados	Pesos Agregados
	(1 = menor, 10 maior)	Método <i>Direct Rating</i>	método Entropia	
C ₁	9	0,265	0,0903	0,181
C ₂	10	0,294	0,1719	0,383
C ₃	2	0,059	0,6140	0,274
C ₄	9	0,265	0,0456	0,091
C ₅	4	0,118	0,0783	0,070

Fonte: Autoria Própria (2019)

 Tabela 6 – Aplicação do método *Direct Rating* – punção e matriz interna

Critério	Importância (z)	Pesos normalizados	Pesos Normalizados	Pesos Agregados
	(1 = menor, 10 maior)	Método <i>Direct Rating</i>	método Entropia	
C ₁	10	0,233	0,070	0,110
C ₂	9	0,209	0,133	0,189
C ₃	5	0,116	0,475	0,375

C_4	7	0,163	0,035	0,039
C_5	7	0,163	0,188	0,208
C_6	5	0,116	0,100	0,079

Fonte: Autoria Própria (2019)

Tabela 7 – Aplicação do método *Direct Rating* – matriz externa

5.4 Aplicação do Método de Decisão: TOPSIS

Foi aplicado o método TOPSIS proposto por Tzeng e Huang (2011). As Tabelas 8 e 9 apresentam os resultados da ordenação das alternativas de projeto propostas, respectivamente, para punção e matriz interna e para matriz externa.

Alternativas para punção e matriz interna	C_i^*	Ordenação
Alternativa 1	0,278	5
Alternativa 2	0,271	6
Alternativa 3	0,515	3
Alternativa 4	0,511	4
Alternativa 5	0,780	1
Alternativa 6	0,776	2
Alternativa 7	0,208	7
Alternativa 8	0,199	8

Fonte: Autoria Própria (2019)

Tabela 8 – Resultado ordenação método TOPSIS – punção e matriz interna

-	C_i^*	Ordenação
Alternativa 1	0,317	9
Alternativa 2	0,252	13
Alternativa 3	0,310	10
Alternativa 4	0,224	14
Alternativa 5	0,474	5
Alternativa 6	0,422	7
Alternativa 7	0,465	6
Alternativa 8	0,410	8
Alternativa 9	0,822	1
Alternativa 10	0,728	3
Alternativa 11	0,793	2
Alternativa 12	0,724	4
Alternativa 13	0,271	11
Alternativa 14	0,205	15
Alternativa 15	0,265	12
Alternativa 16	0,174	16

Fonte: Autoria Própria (2019)

Tabela 9 – Resultado ordenação método TOPSIS – matriz externa

5.5 Análise e Discussão dos Resultados

De acordo com o método de decisão proposto verificou-se que a alternativa 5 é a mais adequada para o punção e matriz interna do ferramental de estampo. A alternativa apresenta menor custo e melhor usinabilidade, os critérios C_1 e C_2 relativos a escolha do material VND – AISI O1, são essenciais para durabilidade do ferramental e estão em níveis intermediários e também apresenta o melhor resultado para o critério C_3 quando comparada às demais alternativas.

O critério C_1 apresenta importância de 0,181, possui o terceiro maior peso quando agregados os pesos do método de entropia e *Direct rating*, que o pondera como o terceiro e segundo maior peso, respectivamente. O critério C_2 apresentou o maior peso após agregação, este foi ponderado com a importância de 0,383. Embora o método de entropia tenha o classificado como segundo de maior peso, o decisor optou por elegê-lo como o de maior, resultando em uma ponderação compatível com a expectativa do decisor.

O método de entropia mostra que o critério C_3 é o de maior peso, por outro lado, o decisor estabeleceu de forma subjetiva o menor peso para este critério. O critério Usinabilidade é o segundo de maior peso após a agregação e possui uma importância de 0,274.

O método de entropia de forma objetiva e o decisor de forma subjetiva, definiram o critério C5 como quarto de maior peso, porém na agregação com uma importância de 0,070 é ponderado como o de menor peso.

O critério C4 é ponderado como o quarto maior peso, com importância de 0,091 após a agregação dos pesos subjetivos do *Direct rating* e objetivo no método de entropia, sua ponderação é o segundo e quinto maior peso, respectivamente. O método *Direct rating* possibilitou o decisor ponderar este critério com a mesma importância do critério C1.

O impacto proporcionado por um tratamento térmico em um terceiro não se mostrou efetivo na escolha da melhor alternativa. O método de decisão TOPSIS demonstra que o custo relacionado ao critério C4 não é justificado, pois quando comparado com alternativas de mesmo material a sua colocação no ranking é inferior.

Para o tratamento das alternativas referentes a matriz externa do ferramental de estampo a alternativa 9 é proposta como a mais adequada. O material da alternativa é o VND - AISI O1, o mesmo apresentado na melhor alternativa dos itens punção e matriz interna, o qual proporciona níveis intermediários de resistência ao desgaste e tenacidade correspondentes aos critérios C1 e C2. O material também apresenta o melhor resultado para o critério C3, quando comparado às demais alternativas.

O critério C1 com a importância de 0,110 possui o quarto maior peso quando agregados os pesos do método de entropia e *Direct rating*, que o pondera como segundo menor peso e maior peso, respectivamente. O método *Direct Rating* possibilitou o decisor ponderar de forma subjetiva este critério com a mesma importância do critério Tratamento térmico.

O critério C2 apresentou o terceiro maior peso após agregação, este foi ponderado com a importância de 0,189. O método de entropia o pondera com o terceiro de maior peso e o decisor com o segundo.

O critério C3 apresentou o maior peso após agregação, este foi ponderado com a importância de 0,375. Embora o decisor tenha estabelecido o menor peso para este critério o método de entropia o ponderou como o maior peso.

O menor peso para seleção da melhor alternativa é o critério C4 que apresenta uma importância de 0,035 após agregação. O decisor estabeleceu a segundo menor peso e o método de entropia o ponderou com o menor.

O critério C5 apresenta importância de 0,208 onde possui o segundo maior peso quando agregados os pesos do método de entropia e *Direct Rating*, que também o pondera com segundo maior peso. O decisor ponderou de forma subjetiva, este critério com a mesma importância do critério C4.

O critério C6 apresenta importância de 0,079 e possui o quinto maior peso agregado, o método de entropia o pondera com quarto maior peso. O decisor ponderou de forma subjetiva este critério com a mesma importância do critério C3.

Diferentemente do caso do itens punção e matriz interna o impacto proporcionado por um tratamento térmico em um terceiro se mostrou efetivo na segunda melhor alternativa.

6. Conclusão

O presente trabalho possibilitou a seleção da melhor alternativa para um projeto de melhoria de um ferramental de estampo de anel externo para rolamento axial, através da tomada de decisão por múltiplos critérios e métodos de ponderação. Os critérios estabelecidos pela análise de modos de falha presentes na metodologia FMEA, possibilitam a eleição de alternativas que evitam a repetição de falhas semelhantes, encontradas no atual projeto do

ferramental.

A aplicação do método de entropia que pondera os critérios sem que haja interferência direta da opinião do decisor, agregado à colaboração do decisor pelo ponderamento por meio do método Direct Rating é uma alternativa viável na seleção de projetos torna o método. Quando agregados retornam pesos mais próximos das expectativas do decisor, pois dessa maneira sua experiência na avaliação da importância de cada critério é utilizada, sem excluir o peso atribuído pelo método de ponderamento objetivo, possibilitando uma melhor ponderação de critérios.

A alternativa 5 é indicada para a melhoria do projeto do punção e da matriz interna, demonstra-se ser satisfatória aos interesses do decisor, por apresentar níveis intermediários de propriedades mecânicas como a resistência ao desgaste e tenacidade, elementos essenciais para vida dos componentes de um ferramental de estampo. A alternativa 7 citada neste trabalho corresponde ao atual projeto do empreendimento referente ao punção e a matriz interna. A alternativa demonstra ser a mais resistente ao desgaste e com segundo menor custo, porém quando o método é associado a outros critérios sua classificação é a segunda mais distante do ideal.

A alternativa 9 é indicada para melhoria do projeto da matriz externa, demonstra-se ser satisfatória aos interesses do decisor, por apresentar o maior nível de usinabilidade, níveis intermediários de resistência ao desgaste e tenacidade, coerentes a maior complexidade de usinagem e menor número de falhas mecânicas. A aplicação da metodologia demonstra que a modificação do projeto geométrico é interessante, mesmo que elevando os custos para sua fabricação. O atual projeto, correspondente à alternativa 14, também apresenta o segundo menor custo e melhor resistência ao desgaste, porém é verificado que seu resultado é penúltimo mais distante do ideal.

Por fim, o presente trabalho apresenta limitações referente ao número de materiais selecionados e suas respectivas propriedades mecânicas. Para trabalhos futuros é indicado a aplicação da metodologia em um maior número de materiais e o estudo de comportamentos mecânicos destes, trazendo valores reais de propriedades mecânicas, bem como análise de mais opções de projetos geométricos e qualificação de propriedades mecânicas posteriores à realização de tratamentos térmicos.

Referências

BEHZADIAN, S.; KHANMOHAMMADI, O.; YAZDANI, M.; IGNATIUS, J., *A state-of-the-art survey of TOPSIS applications*, *Expert Syst*, v. 39, 2012.

BUDYNAS, R.G.; NISBETT, J.K. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. 8º ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. 2ª Edição. v. II. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

FERRARINI, J.L. **Caracterização de matérias para os processos de estampagem**. Porto Alegre: UFRGS, Tese do mestrado em Engenharia, Departamento de conformação mecânica da escola de engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

HWANG, C-L; YOON, K. Methods for multiple attribute decision making. In: **Multiple attribute decision making**. Springer, Berlin, Heidelberg, 1981. p. 58-191.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S.R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6^o ed. New Jersey: 2010.

LIN, M. C.; WANG, C. C.; CHENG, M. S.; CHANG, C. A. Using AHP and TOPSIS approaches in customer-driven product design process. **Computers in Industry**, v. 59, p.17–31, 2008.

LOOTSMA, F.A. **Multi-criteria decision analysis via ratio and difference judgement**. Kluwer Academic, Dordrecht, 1999.

NIJKAMP, P.; RIETVELD, P.; VOOGD, H. **Multicriteria evaluation in physical planning**. Amsterdam: North-Holland. 1990.

SCHNEIDER, H.H.; HARTMANN, R.A.T. **Desenvolvimento de um equipamento didático de processos de conformação**. Curitiba: UTFPR, Tese do Projeto de Pesquisa do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

TZENG, G.H.; HUANG, J.J. **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Application**. 1^o Edition. New York: CRC Press, 2011.

VILLARES METALS. **Aços para ferramentas**, 2014.

ZELENY, M. *The Theory of the Displaced Ideal*. **Multiple Criteria Decision Making Kyoto**, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, p.153–206. 1976.