

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS GUARAPUAVA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LUCAS DE CASTRO CICUTO

**SELEÇÃO DE PROJETOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA EM
FERRAMENTAL DE ESTAMPO POR MEIO DE MÉTODOS
MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2019

LUCAS DE CASTRO CICUTO

**SELEÇÃO DE PROJETOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA EM
FERRAMENTAL DE ESTAMPO POR MEIO DE MÉTODOS
MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação de Engenharia Mecânica, como requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Vinícius Bubna Biscaia.

GUARAPUAVA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

SELEÇÃO DE PROJETOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA EM FERRAMENTAL DE ESTAMPO POR MEIO DE MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO

LUCAS DE CASTRO CICUTO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em Guarapuava, Paraná na data 09 de Julho de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

RICARDO VINÍCIUS BUBNA BISCAIA
Prof. Orientador

ALAMO ALEXANDRE DA SILVA BATISTA
Membro Da Banca

LUIS FERNANDO PAULISTA COTIAN
Membro Da Banca

ALDO PRZYBYSZ
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho ao meus pais por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos, presando pela minha educação e sucesso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço todos envolvidos na coleta de dados da Lwacc do Brasil e principalmente ao melhor professor que conheço, meu Pai, por estar sempre me ensinando sua maestria de empreendedor e ferramenteiro.

Ao Professor Ricardo Biscaia, por ter me orientado e ensinado conteúdos novos.

Aos demais professores que fizeram parte do meu aprendizado e colaboram indiretamente ou diretamente com este trabalho.

A minha namorada por estar sempre ao meu lado, incentivando a sempre buscar conhecimento.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Guarapuava, pelo suporte e oportunidade.

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 modos e efeitos de 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* é utilizado 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 chaves: Projeto mecânico; FMEA; Ferramental de estampo; Método de entropia; *Direct Rating method*; TOPSIS modificado.

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.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo e componentes do processo de cunhagem.....	18
Figura 2 – Diagrama.....	24
Figura 3 – Representação – punção – matriz externa – matriz interna.....	32
Figura 4 – Elementos comprometidos disponibilizados por Lwacc do Brasil – punção e matriz externa.....	34
Figura 5 – Elemento comprometido disponibilizado por Lwacc do Brasil – matriz interna.....	34
Figura 6 – Propriedades dos aços.....	38
Figura 7 – Projeto 1 (atual), Projeto 2 (redimensionado).....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ocorrência (OCC).....	25
Tabela 2 – Severidade (SEV).....	26
Tabela 3 – Detecção (DET).....	26
Tabela 4 – Modelo de decisão	28
Tabela 5 – Dados do corpo do rolamento axial	31
Tabela 6 – FMEA	35
Tabela 7 – Desempenho de cada material.....	39
Tabela 8 – Critérios Desempenho do tratamento térmico para o Processo	39
Tabela 9 – Desempenho indicado pelo decisor do projeto dimensional dos componentes de conformação	39
Tabela 10 – Critério custo associado	40
Tabela 11 – Modelo de alternativas para punção e matriz interna	41
Tabela 12 – Modelo de alternativas para matriz externa.....	41
Tabela 13 – Modelo de decisão – punção e matriz interna	42
Tabela 14 – Modelo de decisão – matriz externa.....	42
Tabela 15 – Pesos dos critérios – punção e matriz interna.....	43
Tabela 16 – Aplicação do método <i>Direct Rating</i> – punção e matriz interna	43
Tabela 17 – Pesos gerais dos critérios – punção e matriz interna	43
Tabela 18 – Pesos dos critérios – matriz externa.....	44
Tabela 19 – Aplicação do método <i>Direct Rating</i> – matriz externa.....	44
Tabela 20 – Pesos gerais dos critérios – matriz externa	44
Tabela 21 – Cálculo do <i>PIS</i> e <i>NIS</i> – punção e matriz interna.....	45
Tabela 22 – Distância entre <i>PIS</i> e <i>NIS</i> – punção e matriz interna.....	45
Tabela 23 – Similaridade relativa para o <i>PIS</i> – punção e matriz interna	46
Tabela 24 – Cálculo do <i>PIS</i> e <i>NIS</i> – matriz externa	46
Tabela 25 – Distância entre <i>PIS</i> e <i>NIS</i> – matriz externa	47
Tabela 26 – Similaridade relativa para o <i>PIS</i> – matriz externa.....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS	16
2.1.1	Operações De Corte Em Chapas Metálicas	16
2.1.2	Operações De Dobra Em Chapas Metálicas	17
2.2	FORJAMENTO	17
2.2.1	Cunhagem	17
2.3	TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS	18
2.3.1	Normalização	19
2.3.2	Têmpera	19
2.3.3	Revenimento	20
2.4	FMEA	20
2.5	MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	INVESTIGAÇÃO DO PROBLEMA	24
3.2	APLICAÇÃO DO FMEA	25
3.3	DEFINIÇÃO DOS DECISORES E DOS CRITÉRIOS RELEVANTES AO PROJETO	27
3.4	PROPOSIÇÃO DE ALTERNATIVAS DE PROJETO	27
3.5	MODELO DE DECISÃO	28
3.6	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PONDERAMENTO	28
3.7	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DECISÃO TOPSIS	29
3.8	PROPOSIÇÃO DA MELHOR ALTERNATIVA DE PROJETO	30
4	ESTUDO DE CASO	31
4.1	ROLAMENTO AXIAL	31
4.2	FERRAMENTAL DE PRODUÇÃO DO ANEL EXTERNO	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5.1	APLICAÇÃO DO FMEA E DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS RELEVANTES	35
5.2	ALTERNATIVAS DE PROJETO	40
5.3	MODELO DE DECISÃO	42
5.4	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PONDERAMENTO: ENTROPIA E <i>DIRECT RATING</i>	43
5.4.1	Aplicação Do Método De Ponderamento De Entropia – Punção E Matriz Interna	43
5.4.2	Aplicação Do Método De Ponderamento De Entropia – Matriz Externa	44

5.5	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DECISÃO	45
5.5.1	Aplicação Do Método – Punção E Matriz Interna.....	45
5.5.2	Aplicação Do Método – Matriz Externa.....	46
5.6	PROPOSIÇÃO DA MELHOR ALTERNATIVA DE PROJETO	47
6	CONCLUSÃO	50
6.1	LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS	52
	APENDICE A – DESENHO TÉCNICO PUNÇÃO	55
	APENDICE B – DESENHO TÉCNICO MATRIZ EXTERNA	56
	APENDICE C – DESENHO TÉCNICO MATRIZ EXTERNA REDIMENSIONADA	57
	APENDICE D – DESENHO TÉCNICO MATRIZ INTERNA	58

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

Diante da globalização, empresas do setor de conformação de chapas metálicas buscam altos níveis de confiabilidade e disponibilidade em seus ferramentais de estampo, mantendo os custos de produção aceitáveis para o mercado. Tendo em vista essa tendência, Ferrarini (2004) mostra a importância da qualidade da matéria prima em seu estudo para processos de fabricação de produtos estampados, onde o controle das chapas metálicas assegura 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 *blank* 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) as 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 estampa é o macaco mecânico utilizado em veículos automotores.

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.

A escolha de critérios relevantes baseados na análise do FMEA 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.

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. E 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 errada 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 e custos. 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 multicritérios, 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.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

Proposição de um modelo de apoio à decisão com métodos de análise com multicritérios que ordene alternativas de projeto de um ferramental de estampo na linha de produção do anel externo de acento plano de rolamentos axiais.

1.1.2 Objetivos específicos

- Investigar os modos de falhas encontradas no ferramental de estamparia na produção de anel externo de rolamentos axiais.

- Estabelecer os critérios e alternativas para o modelo de tomada de decisão no projeto mecânico do ferramental de estampo na linha de produção de anel externo de rolamentos axiais.
- Proposição da melhor alternativa de projeto para uma empresa de fabricação investigada por meio da aplicação do método TOPSIS.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo Pahl *et al.*(2007) engenheiros tem a tarefa de aplicar seus conhecimentos para solução de problemas técnicos e enfatiza também que em um projeto possui restrições e requisitos provenientes de interfaces política, psicológicas, econômica, design, arquitetura e arte, além da disponibilidade dos materiais, normas reguladoras e todos os fatores que interferem a vida humana.

Dentro do cenário industrial o desenvolvimento de projetos depende de profissionais especializados, que se deparam com muitas variáveis. O sucesso de um empreendimento inserido em um ambiente competitivo depende do conhecimento e habilidade dessas pessoas. Estar à frente dos concorrentes se faz necessário para obter sucesso.

Formado por 9.349 empresas em 2016, o cenário industrial do segmento de corte e conformação é abordado por Rezende e Souza (2016). Com olhar político e econômico, descreve o situação do mercado e demonstra que 43,8% de 481 empresas do ramo, pretendiam investir em máquinas novas.

Estes indicativos demonstraram a necessidade de modernização do setor produtivo do segmento, por consequência novos projetos em ferramentas do setor de corte e conformação foram requisitados para oferecer novos produtos e serviços com padrões de qualidade mais altos e preços mais baixos, entretanto, esses projetos possuem critérios conflitantes.

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. Tzeng e Huang (2011) lembram da importância da seleção da alternativa em que oferece as melhores condições para quem toma as decisões e que podem ser amparadas por técnicas que apoiem a tomada desta decisão.

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 profissionais a buscarem 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.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico será tratado o estado da arte referente a área de conformação mecânica em chapas metálicas, forjamento a frio, tratamentos térmicos, FMEA e métodos de tomada de decisão. Contribuindo na elaboração de alternativas de projetos de ferramentas tratadas termicamente para corte, dobra e cunhagem.

2.1 CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS

Hu, Marciniak e Duncan (2002) evidenciam a produtividade de modernos laminadores contínuos de chapas metálicas a baixo custo. As peças de chapa metálica têm a vantagem de ter um alto módulo de elasticidade e alta resistência ao escoamento, de modo que as peças produzidas possam ser rígidas e tenham uma boa relação resistência-peso. Um grande número de técnicas é usado para fazer peças de chapa metálica.

2.1.1 Operações de Corte em Chapas Metálicas

Chiaverini (1986) relata que o corte de chapas é realizado pela ação de um punção de corte. Assistido de uma prensa e o apoio de uma matriz o material sofre pressão pelo deslocamento do punção, que se move para baixo no sentido da matriz.

Kalpakjian e Schmid (2010) relatam que a chapa metálica fica entre os componentes e à medida que o punção começa a ter contato com o metal, ocorre a deformação plástica nas superfícies da chapa. No decorrer do processo ocorre a penetração do punção na chapa e finalmente a fratura da peça de trabalho.

Junior e Caversan (2012) descrevem que folgas excessivas entre punção e matriz, provocam rebarbas na peça e folgas pequenas provocam desgaste rápido das arestas de corte.

Carvalho, Catapan e Cruz (2017) propõem redução de desperdiço de chapas de aço de uma empresa do setor metalúrgico, através de metodologias de causa e efeito concluíram que a falta de investimento e planejamento elevam os gastos por não aproveitamento eficiente da matéria prima.

2.1.2 Operações de Dobra em Chapas Metálicas

Chiaverini (1986) relata que a operação de dobra simples, busca modificar a geometria da peça de acordo com as especificações do punção e matriz do ferramental de estampo. Procura-se manter a espessura da chapa ou evitar qualquer outra alteração dimensional.

Marques *et al.* (2013) desenvolveram um ferramental de dobra com o uso do software SolidWorks. Relatam que geralmente as ferramentas de dobramento são em aço SAE-1045 ou SAE-4140. Podendo receber um tratamento térmico de têmpera. O tratamento térmico aumenta a vida útil, devido sua mudança de propriedades mecânicas e a dureza varia entre 50 a 54 RC, Souza (2001) conclui que para determinação de parâmetros do ferramental, o fator mais importante é a resistência do material. As ferramentas também podem ser intercambiáveis, permitindo a troca rápida e a redução dos custos de fabricação.

2.2 FORJAMENTO

Groover (2014) classifica as operações de forjamento a partir da temperatura de trabalho podendo ser a quente, a morno e a frio, ou seja, quanto menor a temperatura maior será a dificuldade de mudança de geometria, portanto o forjamento a frio é realizado em produtos com de pequenas dimensões e maior precisão dimensional e acabamento superficial.

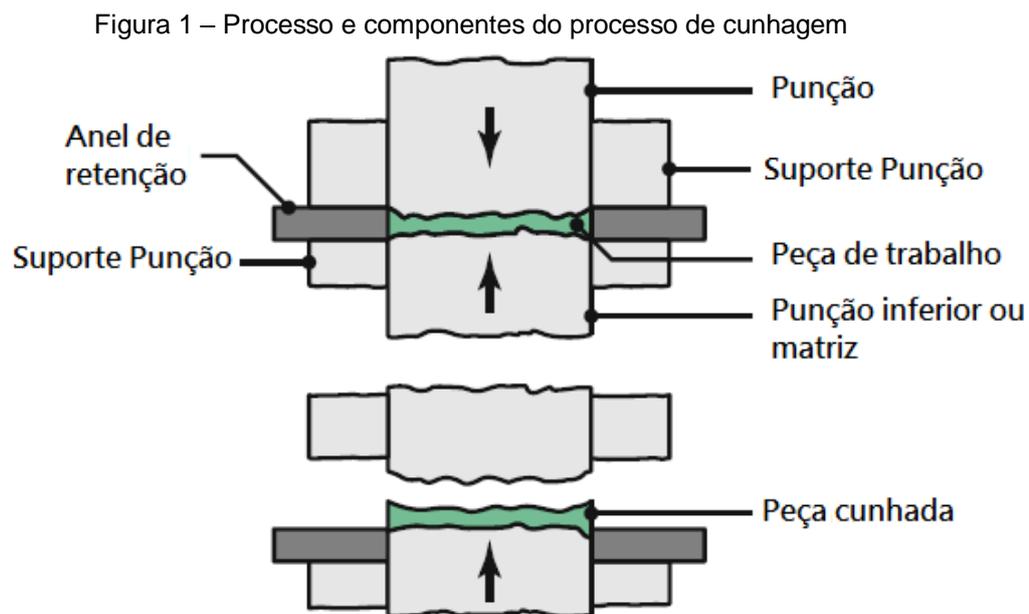
Callister (2008) relata que a realização desse processo em temperatura ambiente, acarretará no encruamento do material, ocasionado pela interação das discordâncias entre si e contornos de grão, que impedem o seu movimento através da rede cristalina, logo resultando em um aumento de resistência à deformação e em um decréscimo da ductilidade do material.

2.2.1 Cunhagem

Kalpakjian e Schmid (2010) relatam que a cunhagem é um processo de forjamento a frio de matriz fechada que necessita de altas pressões para modificar a geometria da peça de trabalho, normalmente são produzidos moedas, medalhões e

joias. Este processo confere precisão dimensional com pouca ou nenhuma alteração no tamanho da peça de trabalho, através da aplicação de forças compressivas de punções sobre o material a ser modificado.

A Figura 1 demonstra o processo de cunhagem e os componentes básicos para realização da conformação.



Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2010 p.343)

Keran, Math e Grizelj (2011) em um experimento e análise numérica sobre o processo de cunhagem recomendam que a matéria prima deve possuir grãos grossos em caso de processo de cunhagem de matriz aberta. Por outro lado, se o fluxo de material é restrito em uma matriz fechada o preenchimento exato da matriz é importante, portanto, materiais que apresentem grãos finos devem ser usados por apresentarem maior fricção nos resultados de simulação.

2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS

Boyer (1987) lembra sobre a importância comercial dos tratamentos térmicos e como seria difícil a vida sem poder modificar as propriedades dos materiais. Sem os benefícios deste processo, as indústrias de automóvel e aeronáutica não existiriam. Uma lâmina de aço afiada não estaria disponível e processos de conformação como o corte e cunhamento não existiriam.

Boyer (1987) relata que os aços respondem a mais de um tratamento térmico e por esta razão detém a maior parcela da produção de metais. Segundo Chiaverini (1986) tratamentos térmicos em aços é o conjunto controlado de operações de aquecimento, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as propriedades ou conferir características determinadas. A modificação dessas propriedades em geral é positiva para alguns aspectos e negativo para outros, por exemplo, o aumento da dureza diminui a ductilidade.

Os aços-ferramenta desenvolvidos para o segmento de conformação mecânica e usinagem necessitam de resistência ao desgaste e resistência à deformação ou fratura.

2.3.1 Normalização

Segundo Callister (2008) a normalização é usada para diminuir o tamanho médio dos grãos e produzir uma distribuição de tamanhos mais uniforme, sendo usado em aços que foram deformados plasticamente.

Segundo Arai et al. (1991) a normalização pode diminuir ou aumentar a força e a dureza de um aço que teve sua geometria modificada e irá depender do histórico térmico e mecânico deste produto. Esta técnica melhora a usinabilidade, ganhos no refinamento estrutural, homogeneização e modificação no stress residual.

Boyer (1987) relata que o processo de normalização é bem-sucedido quando acompanhado de outro tratamento térmico, como austenitização para endurecimento e têmpera.

2.3.2 Têmpera

Chiaverini (1986) descreve têmpera como sendo o aquecimento do aço até sua temperatura de austenitização seguido de um processo de resfriamento rápido. O resfriamento da liga é através da troca de calor para meio líquidos ou gasosos, onde a escolha dos meios é dependente das propriedades do aço a ser trabalhado, resultando em um constituinte final desejado, a martensita.

Arai *et al.* (1991) relatam que a martensita é uma fase de alta dureza devido a supersaturação de carbono e a uma alta densidade de defeitos de cristal. Os aços

martensíticos de altos teores de carbono têm tenacidade insuficiente para muitas aplicações. Em aços ligados com o cromo, molibdênio, vanádio ou tungstênio, a formação de carbonetos de liga ocorre na faixa de temperatura de 500 a 700 ° C.

2.3.3 Revenimento

Como descrito anteriormente o objetivo da têmpera é a obtenção de martensita, sendo que este constituinte possui elevados níveis de tensões residuais e baixa tenacidade, sendo necessária a realização de outro tratamento na sequência para se obter resistência à deformação ou fratura.

Silva e Mei (2010) relatam sobre a aplicação de revenimento múltiplo para aços de alta temperabilidade como os aços-ferramenta. O primeiro ser iniciado com a peça sob faixa de temperatura de 60 a 90°C. Neste primeiro revenimento mais martensita é formada, devido a não transformada durante a têmpera. O segundo processo tem a função de revenir a nova martensita formada podendo ser revenido até mais de duas vezes.

2.4 FMEA

Fogliatto e Ribeiro (2009) apresentam o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) e citam os objetivos da técnica, sendo eles:

- Reconhecer e avaliar falhas potenciais em um produto ou processo;
- Identificar ações que possam eliminar ou reduzir falhas potenciais;
- Criar um referencial técnico para auxiliar em revisões e desenvolvimentos futuros do projeto ou processo;

Fogliatto e Ribeiro (2009) descrevem o FMEA voltado para projetos com uma técnica analítica que assegura a consideração e discussão de potenciais modos de falha e seus respectivos efeitos e causas. Auxiliando na redução de riscos de falha, pois amplia a probabilidade de que todos os modos de falha sejam tratadas.

Filo *et al.* (2018) realizaram uma aplicação do FMEA juntamente com a teoria *fuzzy* para análise de falha de um turbo compressor, onde obteve-se um valor de risco maior comparado com a forma clássica, juntamente com o resultado obtido e

resultados de trabalhos citados pelo autor, concluiu que independentemente da área de aplicação a análise FMEA juntamente com a teoria *fuzzy* pode ser usada para gerenciar o risco em pesquisas interdisciplinares.

Com o levantamento dos modos de falha de um determinado projeto é possível a proposição de alternativas como solução e critérios para que sejam tomadas decisões adequadas para a seleção dos projetos construtivos. Para essa tomada de decisão métodos como MCDM (*Multiple Criteria Decision Making*) ou MCDA (*Multi-Criteria Decision Analysis*), descritos na literatura podem auxiliar na seleção de projetos.

2.5 MÉTODOS DE TOMADA DE DECISÃO

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 decisor 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.

Reichert (2012) ressalta que a diferença entre essas duas correntes de pensamento resulta de uma diferença de atitudes: enquanto a MCDM procura desenvolver um modelo matemático voltado para a busca da solução ótima, independentemente dos indivíduos envolvidos, a MCDA volta-se para construção de modelos com foco decisional, considerando as convicções e valores dos atores envolvidos, com o propósito de construir um modelo com base nas decisões mais adequadas.

Tzeng e Huang (2011) demonstram vários métodos e técnicas na aplicação de MCDM (*Multiple Criteria Decision Making*) ou MCDA (*Multi-Criteria Decision Analysis*) com objetivo de hierarquizar, classificar e clusterizar, sendo eles:

- TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*);
- VIKOR (*Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*);

- ELECTRE (*ELimination Et Choice Translating Reality*);
- PROMETHEE (*Preference Ranking Organization METHods for Enrichment Evaluations*);
- DEMATEL (*Method (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory)*).

Entre os diversos métodos, Hwang e Yoon (1981) propõem que o método TOPSIS 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, proporcionando um ranking de alternativas.

Segundo Behzadian *et al.* (2012) a engenharia é uma área com ampla utilização do método TOPSIS, onde 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 e 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) relatam 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 do estado da arte, 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 o 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).

Os critérios são de natureza quantitativa, Zeleny (1976) desenvolveu o método de entropia, que depende apenas da variabilidade dos valores no

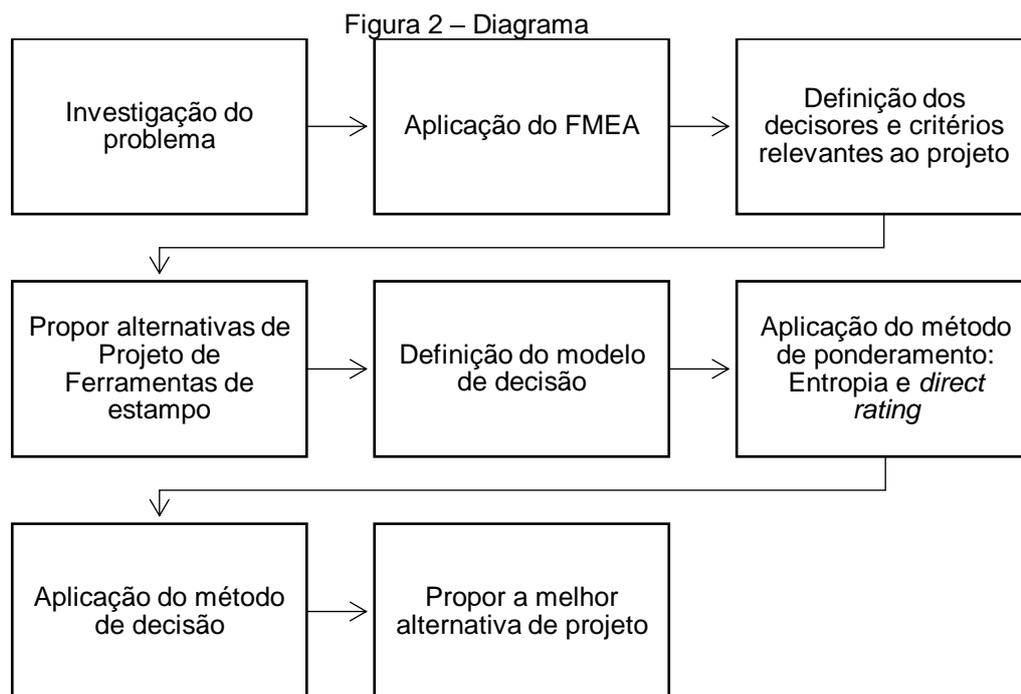
estabelecimento dos pesos, onde relata que o método é uma medida da incerteza da informação.

Direct Rating Method descrito por Nijkamp *et al.* (1990) é uma técnica de classificação que obtém 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, relatando que 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, seguido de uma ponderação secundária, deste modo alguns atributos originalmente de menor importância podem ser ponderados com uma alta importância ou de maior importância serem atribuídos com uma menor importância.

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 diagrama da Figura 2.



Fonte: Autoria Própria (2019)

3.1 INVESTIGAÇÃO DO PROBLEMA

Para investigação do problema foi analisado um estudo de caso de uma empresa do setor produtivo de conformação mecânica de rolamentos axiais de assento plano. A análise é baseada no levantamento de informações sobre o produto e nas principais falhas mecânicas de um ferramental responsável pela produção do anel externo de rolamentos axiais de assento plano. O empreendimento busca por um projeto de ferramental resistente mecanicamente e que possa ser produzido por processos de usinagem convencionais.

Com a exposição dos problemas do estudo de caso e o estudo dos principais modos de falha através do FMEA, é possível eleger critérios relevantes ao projeto.

3.2 APLICAÇÃO DO FMEA

O modelo FMEA proposto neste trabalho segue como o descrito por Bertsche (2008). As primeiras colunas da folha de formulário são reservadas para a descrição dos componentes e suas funções, a seguinte seção da folha de formulário lida como potencial modo de falha, seguido por causas potenciais, em geral cada modo de falha corresponde um efeito. O último passo é um compilado para análise da avaliação de risco, contida na quarta coluna com os seguintes componentes:

- Modo de controle: definição / determinação de todos os controles atuais relacionados com Potenciais Modos de Falha;
- Ocorrência ou probabilidade de os Potenciais Modos de Falha ocorrer (OCC), se trata de uma escala qualitativa de 1 a 10. Através de um questionamento o Decisor deverá seguir a escala de importância demonstrado na Tabela 1;

Tabela 1 – Ocorrência (OCC)

Ocorrência de falha	Taxa de falha	Escala
Muito alta	100/1000	10
	50/1000	9
Alta	20/1000	8
	10/1000	7
	5/1000	6
Moderada	2/1000	5
	1/1000	4
Baixa	0,5/1000	3
	0,1/1000	2
Mínima	0,01/1000	1

Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2009 p.181)

- Severidade (SEV) se trata de uma avaliação qualitativa de 1 a 10, da severidade dos Potenciais Modos de Falha. Através de um questionamento o Decisor deverá seguir a escala de importância demonstrado na Tabela 2;

Tabela 2 – Severidade (SEV)

Severidade do efeito		Escala
Muito alta	Quando compromete a segurança da operação ou envolve infração a regulamentos governamentais	10
		9
Alta	Quando provoca alta insatisfação, sem funcionamento	8
		7
Moderada	Queda de desempenho ou mal funcionamento parcial	6
		5
Baixa	Apenas uma leve deterioração ou queda no desempenho	4
		3
Mínima	Falha que afeta minimamente o desempenho do sistema	2
		1

Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro, (2009 p.179)

- Detecção (DET) se trata de uma estimativa dos controles detectarem os Potenciais Modos de Falha. Através de um questionamento o Decisor deverá seguir a escala de importância demonstrado na Tabela 3;

Tabela 3 – Detecção (DET)

Possibilidade de detecção		Escala
Muito Remota	O PVP não irá detectar esse modo de falha;	10
Remota	O PVP provavelmente não irá detectar esse modo de falha;	9
		8
Baixa	Baixa probabilidade do PVP não detectar esse modo de falha;	7
		6
Moderada	O PVP pode detectar o modo de falha;	5
		4
Alta	Alta probabilidade do PVP detectar esse modo de falha;	3
		2
Muito Alta	Quase certo que o PVP irá detectar esse modo de falha.	1

Fonte: Adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2009 p.182)

- Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009) a avaliação do risco é geralmente a multiplicação dos itens, $RPN = S \times O \times D$. Permitindo uma apreciação aproximada de risco suficiente para análise e revisão de projeto.

A identificação dos elementos mais críticos do FMEA de um novo projeto e da análise de falhas em projetos anteriores possibilita a proposição de alternativas de

projeto mais completas e coerentes com as especificações e necessidades, pois reduzem a probabilidade de falhas como descrito por Fogliatto e Ribeiro (2009).

Os modos de controle apresentam informações para determinar decisores e critérios relevantes possibilitando a criação de alternativas e critérios para a melhoria do projeto.

3.3 DEFINIÇÃO DOS DECISORES E DOS CRITÉRIOS RELEVANTES AO PROJETO

Com análise dos potenciais modos de falhas e análise de risco do FMEA, proveniente de um estudo de caso em ferramental de conformação mecânica de ferramental de estampo estabelece-se onde ocorrerá à busca de critérios relevantes ao projeto, bem como da entrevista com os decisores que possuem o conhecimento técnico e prático do problema estudado.

Zardari *et al.* (2015) relata que o Decisor, deve estabelecer e atribuir pesos para critérios relevantes ao projeto.

Em critérios subjetivos é avaliado juntamente com decisor com os critérios citados por Lootsma (1999), sendo eles: Excelentes (10); Bom (8); Justo (6); Insatisfatório (4); Muito pobre (3).

3.4 PROPOSIÇÃO DE ALTERNATIVAS DE PROJETO

As alternativas de projetos são propostas a partir da interação de um número finito de critérios. Sabe-se que em projetos mecânicos devem ser considerados aspectos dimensionais, material utilizado, ambiente de utilização, tratamentos térmicos, custos. A priorização de cada aspecto é fundamental na proposta de alternativas de projeto, com o levantamento dos pontos mais críticos dos projetos por meio da aplicação do FMEA, identifica-se a possibilidade da proposta de alternativas de projetos que combinam os critérios relevantes aos projetos em análise.

3.5 MODELO DE DECISÃO

Segundo Tzeng e Huang (2011) dado um conjunto de alternativas $A = \{A_i \mid k = 1, \dots, n\}$, e um conjunto de critérios, $C = \{C_j \mid j = 1, \dots, m\}$, onde $X = \{X_{ij} \mid k = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m\}$ denotam um conjunto de ranking de performance e $w = \{w_j \mid j = 1, \dots, m\}$ um conjunto de pesos. Essas informações são compiladas na Tabela 4.

Tabela 4 – Modelo de decisão

-	C_1	C_2	...	C_m
Alternativa 1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1m}
Alternativa 1	x_{21}	x_{22}	...	x_{2m}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Alternativa n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nm}
W	w_1	w_2	...	w_m

Fonte: Adaptado de Tzeng e Huang (2011 p. 40)

Com o modelo, demonstrado na Tabela 4 é possível a aplicação de métodos de ponderamento para obtenção dos pesos para os critérios.

3.6 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PONDERAMENTO

O método de entropia será associado ao método *Direct Rating*. Dessa forma tanto a variabilidade dos dados quanto a opinião dos decisores serão considerados para o ponderamento dos critérios.

Para o ponderamento pelo método de entropia, os seguintes passos são descritos por Zeleny (1976):

1ºPasso: Normalização do modelo de decisão.

$$\begin{aligned}
 & i = 1, \dots, m; \\
 & j = 1, \dots, n
 \end{aligned}
 \quad
 r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}
 \quad
 (1)$$

2ºPasso: Definição dos pesos dos critérios pelo método de entropia com as seguintes equações.

$$\begin{array}{l} i = 1, \dots, m; \\ j = 1, \dots, n \end{array} \quad E_j = \frac{-(\sum_{i=1}^m r_{ij} \ln(r_{ij}))}{\ln(m)} \quad (2)$$

$$j = 1, \dots, n \quad w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (3)$$

Para a aplicação do método *Direct Rating*, atribui-se grau de importância em escala de 1 a 10, de acordo com o modelo proposto por Nijkamp *et al.* (1990)

Em seguida os valores indicados pelos decisores e na sequência normaliza-se o peso dos critérios para obtenção do peso normalizado, por meio da seguinte equação:

$$z_j = \frac{x_j}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$$

Zeleny (1976) propõe o *Attribute overall Importance Weighting* um método que agrega peso dos critérios obtidos pelo método da entropia e os pesos dados subjetivamente pelo método *Direct Rating*, através da determinação do peso geral e normalização, com as equações 6 e 7.

$$j = 1, \dots, n \quad w'_j = w_j \cdot z_j \quad (6)$$

$$j = 1, \dots, n \quad wn'_j = \frac{w_j \cdot z_j}{\sum_{j=1}^n (w_j \cdot z_j)} \quad (7)$$

3.7 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DECISÃO TOPSIS.

TOPSIS é um método de apoio à tomada de decisão desenvolvido para solucionar problemas de decisão onde proporciona um *ranking* de alternativas, com base na mais próxima da solução ideal até a mais distante. A alternativa ideal maximiza os benefícios e minimiza os custos, indo de encontro com o objetivo deste trabalho.

Para aplicação do método TOPSIS proposto por Tzeng e Huang (2011) seguimos as etapas:

1ºPasso: Com o modelo normalizado e ponderado é calculado o ponto ideal positivo (PIS) e ideal negativo (NIS), pelas equações:

$$\begin{aligned} PIS = A^+ &= \{v_1^+(x), v_2^+(x), \dots, v_j^+(x), \dots, v_m^+(x)\} \\ &= \{(max_i v_{ij}(x) | j \in J_1), (min_i v_{ij}(x) | j \in J_2) | i = 1, \dots, n\}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} NIS = A^- &= \{v_1^-(x), v_2^-(x), \dots, v_j^-(x), \dots, v_m^-(x)\} \\ &= \{(min_i v_{ij}(x) | j \in J_1), (max_i v_{ij}(x) | j \in J_2) | i = 1, \dots, n\}, \end{aligned} \quad (9)$$

2ºPasso: Cálculo da distância Euclidiana entre PIS e NIS, pelas fórmulas:

$$i = 1, \dots, n \quad D_k^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m [v_{ij}(x) - v_j^+(x)]^2} \quad (10)$$

e

$$i = 1, \dots, n \quad D_k^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m [v_{ij}(x) - v_j^-(x)]^2} \quad (11)$$

3ºPasso: Cálculo da similaridade relativa para o PIS

$$i = 1, \dots, n \quad C_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^* + D_i^-}, \quad (12)$$

onde $C_i^* \in [0,1] \quad \forall i = 1, \dots, n$.

3.8 PROPOSIÇÃO DA MELHOR ALTERNATIVA DE PROJETO

Tzeng e Huang (2011) mostram que o método ordena as preferências de acordo com as semelhanças PIS (C_k^*) em ordem decrescente para escolher a melhor alternativa.

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.

4.1 ROLAMENTO AXIAL

O rolamento axial é um dos elementos de um macaco mecânico de automóvel que permite a rotação do elemento roscado que resulta na transformação da força externa em torque e posteriormente em força vertical, assim possibilitando o 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 5.

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

Fonte: Aatoria Própria (2019)

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, trados termicamente por cementação. O separador de esfera e esferas são obtidos de terceiros, o conjunto é montado pela fábrica.

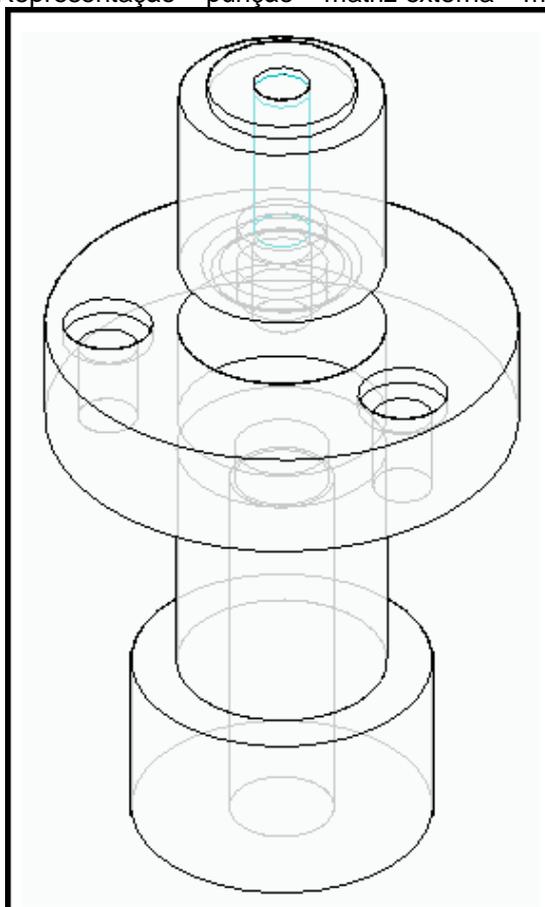
A fabricação do anel externo de assento plano é produto de subprodutos de outra operação.

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

4.2 FERRAMENTAL DE PRODUÇÃO DO ANEL EXTERNO.

O atual ferramental é totalmente produzido pelo empreendimento, seguindo as etapas de usinagem, tratamento térmico e montagem. O punção, a matriz interna e a matriz externa estão representados em ordem na Figura 3.

Figura 3 – Representação – punção – matriz externa – matriz interna



Fonte: Autoria Própria (2019)

Atualmente o ferramental é fabricado em aço VC-131 – AISI D6 de forma convencional com operações de torneamento, fresamento, furação e rosqueamento. As especificações geométricas em desenhos técnicos dos elementos estão disponíveis nos apêndices A, B, D.

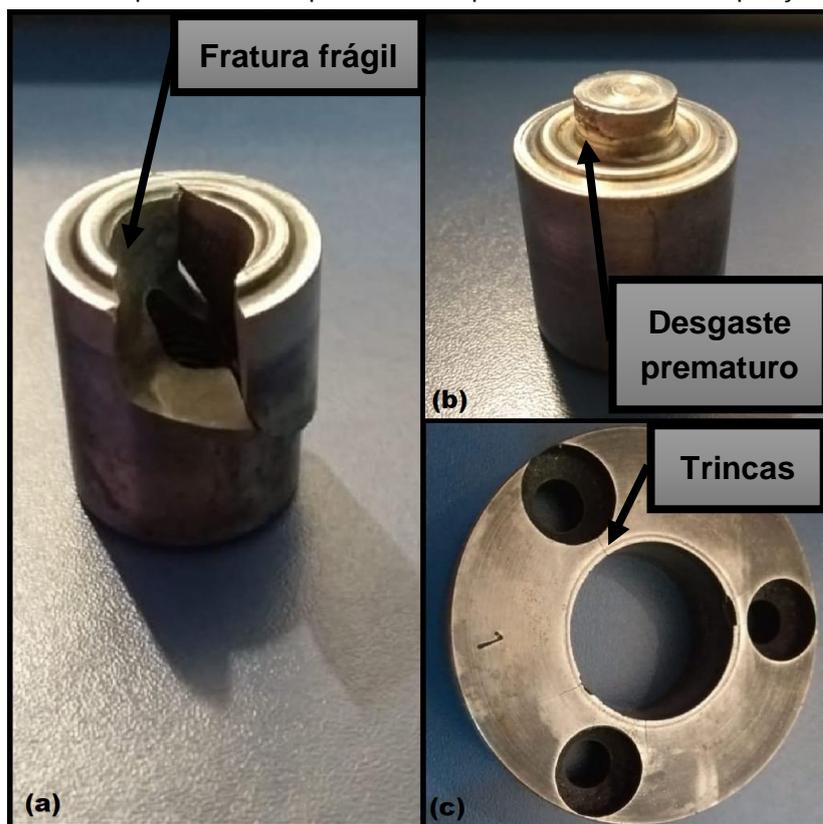
Atualmente o tratamento térmico do ferramental é realizado no empreendimento onde não é adotado controle de temperatura e de outras variáveis, sua realização é baseada na mudança de coloração do material, que passa por um processo de aquecimento e resfriamento rápido, posteriormente um aquecimento brando e resfriamento lento.

O ferramental responsável pela produção do anel externo deve realizar duas etapas, a primeira o corte externo mais dobra, a segunda o corte interno mais cunhagem. Para se obter maior produtividade e menor custo essas duas etapas serão realizadas no mesmo processo. Na primeira etapa o material será solicitado para o corte e dobra onde origina-se um disco com angulação interna, esse ângulo é dependente da deformação do material e dos parâmetros da segunda etapa, mais especificamente da altura da cabeça de corte interno do punção e da posição da matriz interna de corte do furo interno.

O ferramental é importante para o processo como um todo, contudo o ferramental não vem apresentando uma boa durabilidade, prejudicando a produção e ocasionando retrabalho. Uma análise mais aprofundada sobre o problema se faz necessária para definição dos decisores e critérios relevando para um novo projeto.

Elementos que sofreram falhas em operação foram disponibilizados para fins de estudo por Lwacc do Brasil. A Figura 4 mostra exemplos de falhas desse ferramental. É possível verificar no item (a) um colapso do punção de corte e cunhagem, o item (b) também, corresponde a um punção de corte e cunhagem, porém este se desgastou de forma precoce. O item (c) corresponde a matriz de corte do diâmetro externo, que por sua vez apresentou trincas e foi substituída preventivamente. É possível verificar a existência de limitação por parte de projeto, devido à proximidade de furos.

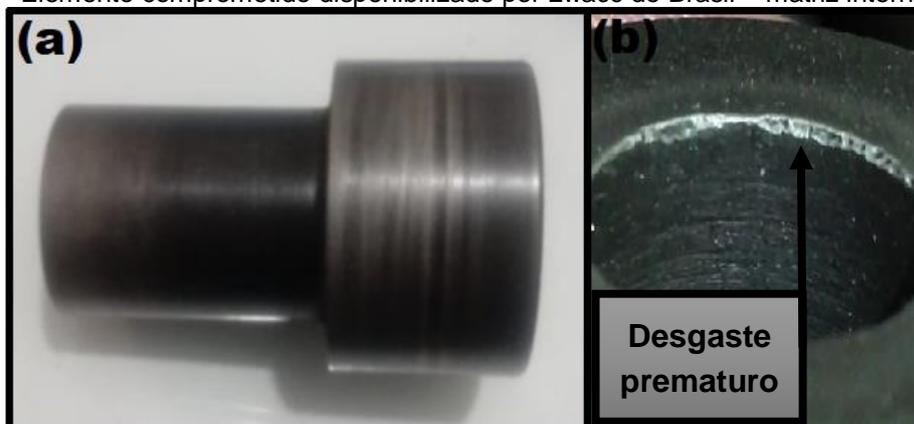
Figura 4 – Elementos comprometidos disponibilizados por Lwacc do Brasil – punção e matriz externa



Fonte: Autoria Própria (2019)

A Figura 5 demonstra em (a) a matriz de corte de diâmetro interno e cunhagem do anel, onde o ressalto do punção entra no furo superior da matriz com desgaste demonstrada em (b), este desgaste provoca rebarba no furo interno do anel externo de rolamento axial.

Figura 5 – Elemento comprometido disponibilizado por Lwacc do Brasil – matriz interna



Fonte: Autoria Própria (2019)

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.

5.1 APLICAÇÃO DO FMEA E DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS RELEVANTES

O FMEA é realizado com base nos dados fornecidos por Lwacc do Brasil, por meio de questionário. É apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – FMEA

SISTEMA: FERRAMENTA DE ESTAMPARIA DE ANEL DE ROLAMENTO				
COMPONENTE	FUNÇÃO REQUERIDA	POTENCIAIS MODOS DE FALHA	EFEITO DA FALHA	CAUSAS POTENCIAIS
ESPIGA	FIXAÇÃO DA BASE SUPERIOR NO CABEÇOTE	FRATURA	PARADA DA PRODUÇÃO	FADIGA
BUCHAS	GUIAM AS COLUNAS DO ESTAMPO	DESGASTE	PARADA DA PRODUÇÃO	ATRITO
PARAFUSOS	FIXAM UM COMPONENTE NO OUTRO	FRATURA	MAL FUNCIONAMENTO	ERRO DE PROJETO FADIGA
EXTRATOR	EXTRAI A PEÇA DA MATRIZ E DO PUNÇÃO	FRATURA	PARADA DA PRODUÇÃO	FADIGA

(continua)

		DATA:		RESP:				LUCAS DE C. CICUTO
COMPONENTE	MODOS DE CONTROLE	O C C	S E V	D E T	R P N	AÇÕES PARA ELIMINAR A FALHA		
ESPIGA	INSPEÇÃO VISUAL	1	7	1	7	MANUTENÇÃO PREVENTIVA		
BUCHAS	INSPEÇÃO VISUAL	1	1	1	1	MANUTENÇÃO PREVENTIVA		
PARAFUSOS	INSPEÇÃO VISUAL	1	2	8	16	REDIMENSIONAMENTO		
EXTRATOR	INSPEÇÃO VISUAL	2	9	1	18	MANUTENÇÃO PREVENTIVA		

SISTEMA:	FERRAMENTA DE ESTAMPARIA DE ANEL DE ROLAMENTO			
COMPONENTE	FUNÇÃO REQUERIDA	POTENCIAIS MODOS DE FALHA	EFEITO DA FALHA	CAUSAS POTENCIAIS
PUNÇÃO E MATRIZ INTERNA	PERMITE O CORTE DOS FUROS INTERNO, EXTERNOS E A CUNHAGEM DO ANEL	FRATURA	PARADA DA PRODUÇÃO	MATERIAL INADEQUADO
		DESGASTE	DIMINUIÇÃO DA QUALIDADE DO PRODUTO FINAL	USINAGEM INADEQUADA TRATAMENTO TÉRMICO INADEQUADO MATERIAL INADEQUADO TRATAMENTO TÉRMICO INADEQUADO
MATRIZ EXTERNA	PERMITE O CORTE DO DIÂMETRO EXTERNO DO ANEL	FRATURA	PARADA DA PRODUÇÃO	MATERIAL INADEQUADO DIMENSIONAMENTO DE PROJETO INADEQUADO
		DESGASTE	DIMINUIÇÃO DA QUALIDADE DO PRODUTO FINAL	USINAGEM INADEQUADA TRATAMENTO TÉRMICO INADEQUADO
		TRINCA	DIMINUIÇÃO DA RESISTÊNCIA DA FERRAMENTA	MATERIAL INADEQUADO TRATAMENTO TÉRMICO INADEQUADO MATERIAL INADEQUADO DIMENSIONAMENTO DE PROJETO INADEQUADO

Tabela 6 – FMEA

(conclusão)

	DATA:	RESP:				LUCAS DE C. CICUTO
COMPONENTE	MODO DE CONTROLE	O C C	S E V	D E T	R P N	AÇÕES PARA ELIMINAR A FALHA
	QUANTIFICAÇÃO DE FALHAS (EMPIRICO)					
	VERIFICAÇÃO DE MEDIDAS	5	8	2	80	APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO
PUNÇÃO E MATRIZ INTERNA	QUANTIFICAÇÃO DE FALHAS (EMPIRICO)					
	INSPEÇÃO VISUAL	6	6	3	108	APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO
	INSPEÇÃO VISUAL					
	QUANTIFICAÇÃO DE FALHAS (EMPIRICO)					
	ANÁLISE DO PROJETO	4	8	2	64	APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO
	VERIFICAÇÃO DE MEDIDAS					
	QUANTIFICAÇÃO DE FALHAS (EMPIRICO)					
MATRIZ EXTERNA	QUANTIFICAÇÃO DE FALHAS (EMPIRICO)	5	6	3	90	APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO
	INSPEÇÃO VISUAL					
	QUANTIFICAÇÃO DE FALHAS (EMPIRICO)					
		6	6	3	108	APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO
	ANÁLISE DO PROJETO					

Fonte: Autoria Própria (2019)

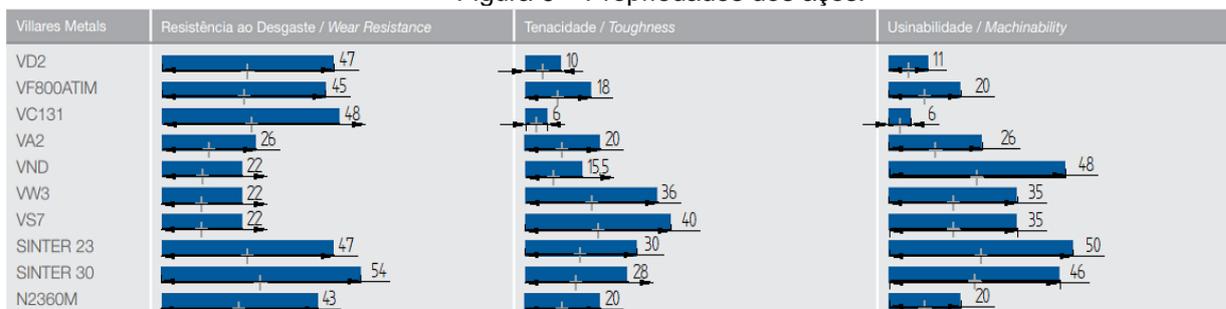
Os itens punção e matriz interna mais a matriz externa apresentam maior risco para o sistema, estes serão objeto de análise e revisão de projeto.

A partir das causas potenciais descritas no FMEA é possível a eleição de critérios relevantes para o estudo, para os itens de maior risco, sendo eles:

- 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 C_1 e C_2 respectivamente, para estudo deste trabalho. Os pesos dos critérios são demonstrados na Figura 6.

Figura 6 – Propriedades dos aços.



Fonte: Adaptado de Villares Metals (2014 p. 4)

Nem todos materiais demonstrados na Figura 6, 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.

- Usinagem

Outra causa potencial que tem relação com a escolha do material é usinagem inadequada, com a eleição do critério usinabilidade (C_3) do material disponível na Figura 7, é possível obter alternativas que proporcionem melhor qualidade da ferramenta.

A Tabela 7 demonstra os pesos dos critérios C_1 , C_2 e C_3 para cada material escolhido de acordo com análise das barras de Villares Metals (2014).

Tabela 7 – Desempenho de cada material

Aços	C ₁ Resistencia ao desgaste	C ₂ Tenacidade	C ₃ Usinabilidade
VD2 - AISI D2	47	10	11
VF800ATIM	45	18	20
VND - AISI O1	22	15,5	48
VC131 - AISI D6	48	6	6

Fonte: Adaptado de Villares Metals (2014)

- 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. A Tabela 8 compila esse critério e seu impacto.

Tabela 8 – Critérios Desempenho do tratamento térmico para o Processo

Tratamento térmico	Impacto
Interno	1
Terceirização	1,5

Fonte: Autoria Própria (2019)

- Dimensionamento de projeto

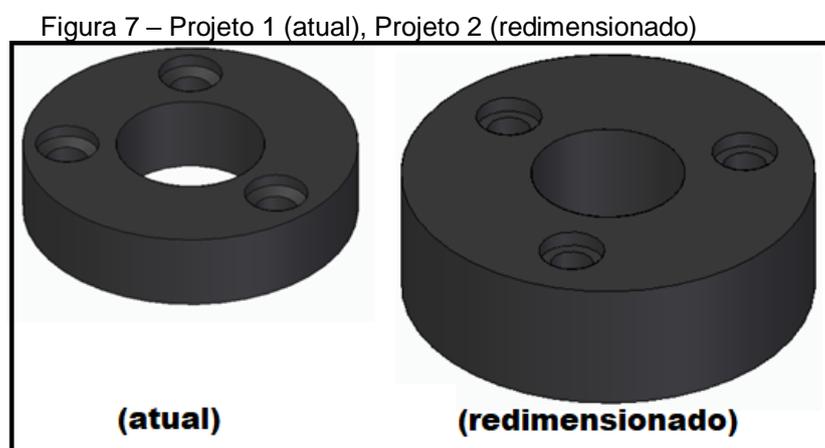
Com a análise do projeto é verificado a possibilidade de redimensionamento da matriz externa, buscando um projeto mais robusto. Comparando-se os dois projetos, o decisor indica inicialmente o desempenho subjetivo, de acordo com sua experiência, e será tratado como critério C₅.

Tabela 9 – Desempenho indicado pelo decisor do projeto dimensional dos componentes de conformação

Projeto geométrico	Desempenho
Projeto 1 (atual)	Muito pobre (3)
Projeto 2 (redimensionado)	Bom (8)

Fonte: Autoria Própria (2018)

A Figura 7 ilustra a modificação do projeto geométrico, no primeiro item é representado o Projeto 1 (atual) e o segundo item o projeto 2 (redimensionado), os desenhos técnicos estão presentes nos apêndices B e C, respectivamente.



Fonte: Autoria Própria (2019)

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 C_5 para o punção e matriz interna e C_6 para a matriz externa sendo demonstrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Critério custo associado

Item		Custo (R\$)
Material	VD2 - AISI D2	29,00
	VF800ATIM	43,38
	VND - AISI O1	20,50
	VC131 - AISI D6	27,50
Tratamento térmico	Interno	30,00
	Terceirização	120,00
Geometria	Manter	70,00
	Modificar	200,00

Fonte: Autoria Própria (2019)

5.2 ALTERNATIVAS DE PROJETO

Neste tópico são descritos as alternativas encontradas para o ferramental de produção do anel externo.

Para montagem de cada alternativa no que se refere ao punção e a matriz interna é realizado a interação entre os critérios descritos no tópico anterior. Para

estes itens é proposto o estudo de seleção de material e tratamento térmico com o custo associado da alternativa, sendo assim é possível gerar alternativas demonstradas na Tabela 11. 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.

Tabela 11 – Modelo de alternativas para punção e matriz interna

-	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)

Para montagem de cada alternativa no que se refere a matriz externa será adotado interação dos critérios descritos no tópico anterior. Para estes itens é proposto o estudo de seleção de material, tratamento térmico e seleção de projeto geométrico com o custo associado, as alternativas são demonstradas na Tabela 12.

Tabela 12 – Modelo de alternativas para matriz externa

-	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)

5.3 MODELO DE DECISÃO

As matrizes de decisão montadas nas Tabelas 13 e 14 trazem um conjunto de alternativas, critérios e os respectivos desempenhos de cada alternativa. Sendo que na Tabela 13 está descrito o modelo para seleção do punção e a matriz interna e a Tabela 14 para matriz externa.

Tabela 13 – Modelo de decisão – punção e matriz interna

Custo/benefício	+	+	+	+	-
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
-	Resistência ao desgaste	Tenacidade e	Usinabilidade e	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 14 – Modelo de decisão – matriz externa

Custo/benefício	+	+	+	+	+	-
	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)

5.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PONDERAMENTO: ENTROPIA E *DIRECT RATING*

5.4.1 Aplicação do Método de Ponderamento de Entropia – Punção e Matriz Interna

Inicialmente o modelo de decisão para o punção e matriz interna é normalizado e posteriormente ponderado pelo método de entropia. A definição dos pesos dos critérios são demonstrados na Tabela 15.

Tabela 15 – Pesos dos critérios – punção e matriz interna

-	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
w_j	0,0903	0,1719	0,6140	0,0456	0,0783

Fonte: Aatoria Própria (2019)

É atribuído pelo decisor grau de importância de escala 0 – 10 pontos. A aplicação do método *Direct Rating* é demonstrado na Tabela 16.

Tabela 16 – Aplicação do método *Direct Rating* – punção e matriz interna

Critério	Importância (z) (1 = menor, 10 maior)	Importância normalizada
C_1	9	0,265
C_2	10	0,294
C_3	2	0,059
C_4	9	0,265
C_5	4	0,118

Fonte: Aatoria Própria (2019)

Posteriormente é determinado o peso geral e sua normalização que são demonstrados na Tabela 17.

Tabela 17 – Pesos gerais dos critérios – punção e matriz interna

-	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
w'_j	0,024	0,051	0,036	0,012	0,009
wn'_j	0,181	0,383	0,274	0,091	0,070

Fonte: Aatoria Própria (2019)

5.4.2 Aplicação do Método de Ponderamento de Entropia – Matriz Externa

Inicialmente o modelo de decisão para o punção e matriz externa é normalizado e posteriormente ponderado pelo método de entropia. A definição dos pesos dos critérios são demonstrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Pesos dos critérios – matriz externa

-	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
w_j	0,070	0,133	0,475	0,035	0,188	0,100

Fonte: Aatoria Própria (2019)

É atribuído pelo decisor grau de importância de escala 0 – 10 pontos. A aplicação do método *Direct Rating* é demonstrado na Tabela 19.

Tabela 19 – Aplicação do método *Direct Rating* – matriz externa

Critério	Importância (z) (1 = menor, 10 maior)	Importância normalizada
C_1	10	0,233
C_2	9	0,209
C_3	5	0,116
C_4	7	0,163
C_5	7	0,163
C_6	5	0,116

Fonte: Aatoria Própria (2019)

Posteriormente é determinado o peso geral e sua normalização que são demonstrados na Tabela 20.

Tabela 20 – Pesos gerais dos critérios – matriz externa

-	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
w'_j	0,016	0,028	0,055	0,006	0,031	0,012
wn'_j	0,110	0,189	0,375	0,039	0,208	0,079

Fonte: Aatoria Própria (2019)

5.5 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DECISÃO

5.5.1 Aplicação do Método – Punção e Matriz Interna.

1ºPasso: Com o modelo normalizado é calculado do ponto ideal positivo (PIS) e ideal negativo (NIS), demonstrados na Tabela 21.

Tabela 21 – Cálculo do *PIS* e *NIS* – punção e matriz interna

Critérios	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
Custo / Benefício	+	+	+	+	-
Pesos	0,181	0,383	0,274	0,091	0,070
Alternativa 1	0,145	0,101	0,065	0,100	0,092
Alternativa 2	0,145	0,101	0,065	0,150	0,156
Alternativa 3	0,139	0,182	0,118	0,100	0,102
Alternativa 4	0,139	0,182	0,118	0,150	0,167
Alternativa 5	0,068	0,157	0,282	0,100	0,086
Alternativa 6	0,068	0,157	0,282	0,150	0,150
Alternativa 7	0,148	0,061	0,035	0,100	0,091
Alternativa 8	0,148	0,061	0,035	0,150	0,155
<i>PIS</i>	0,148	0,182	0,282	0,150	0,086
<i>NIS</i>	0,068	0,061	0,035	0,100	0,167

Fonte: Autoria Própria (2019)

2ºPasso: Cálculo da distância Euclidiana entre PIS e NIS da matriz ponderada, demonstradas na Tabela 22.

Tabela 22 – Distância entre PIS e NIS – punção e matriz interna

-	D_i^*	D_i^-
Alternativa 1	0,125	0,048
Alternativa 2	0,126	0,047
Alternativa 3	0,088	0,093
Alternativa 4	0,089	0,093
Alternativa 5	0,041	0,144
Alternativa 6	0,041	0,143
Alternativa 7	0,150	0,040
Alternativa 8	0,151	0,037

Fonte: Autoria Própria (2019)

3ºPasso: Cálculo da similaridade relativa para o PIS, demonstrada na Tabela 23.

Tabela 23 – Similaridade relativa para o PIS – 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)

5.5.2 Aplicação do Método – Matriz Externa.

1ºPasso: Com o modelo normalizado é calculado do ponto ideal positivo (PIS) e ideal negativo (NIS), demonstrados na Tabela 24.

Tabela 24 – Cálculo do PIS e NIS – matriz externa

Critérios	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
Custo / Benefício	+	+	+	+	+	-
Pesos	0,110	0,189	0,375	0,039	0,208	0,079
Alternativa 1	0,073	0,051	0,032	0,050	0,091	0,067
Alternativa 2	0,073	0,051	0,032	0,050	0,034	0,034
Alternativa 3	0,073	0,051	0,032	0,075	0,091	0,091
Alternativa 4	0,073	0,051	0,032	0,075	0,034	0,057
Alternativa 5	0,069	0,091	0,059	0,050	0,091	0,071
Alternativa 6	0,069	0,091	0,059	0,050	0,034	0,037
Alternativa 7	0,069	0,091	0,059	0,075	0,091	0,095
Alternativa 8	0,069	0,091	0,059	0,075	0,034	0,061
Alternativa 9	0,034	0,078	0,141	0,050	0,091	0,065
Alternativa 10	0,034	0,078	0,141	0,050	0,034	0,031
Alternativa 11	0,034	0,078	0,141	0,075	0,091	0,089
Alternativa 12	0,034	0,078	0,141	0,075	0,034	0,055
Alternativa 13	0,074	0,030	0,018	0,050	0,091	0,067
Alternativa 14	0,074	0,030	0,018	0,050	0,034	0,033
Alternativa 15	0,074	0,030	0,018	0,075	0,091	0,090
Alternativa 16	0,074	0,030	0,018	0,075	0,034	0,057
PIS	0,074	0,091	0,141	0,075	0,091	0,031
NIS	0,034	0,030	0,018	0,050	0,034	0,095

Fonte: Autoria Própria (2019)

2ºPasso: Cálculo da distância Euclidiana entre PIS e NIS da matriz ponderada, demonstradas na Tabela 25.

Tabela 25 – Distância entre PIS e NIS – matriz externa

-	D_i^*	D_i^-
Alternativa 1	0,070	0,032
Alternativa 2	0,074	0,025
Alternativa 3	0,071	0,032
Alternativa 4	0,074	0,021
Alternativa 5	0,052	0,047
Alternativa 6	0,057	0,042
Alternativa 7	0,054	0,047
Alternativa 8	0,057	0,040
Alternativa 9	0,018	0,083
Alternativa 10	0,030	0,080
Alternativa 11	0,022	0,083
Alternativa 12	0,030	0,079
Alternativa 13	0,081	0,030
Alternativa 14	0,084	0,022
Alternativa 15	0,082	0,030
Alternativa 16	0,085	0,018

Fonte: Autoria Própria (2019)

3ºPasso: Cálculo da similaridade relativa para o PIS é demonstrada na Tabela 26.

Tabela 26 – Similaridade relativa para o PIS – matriz externa

-	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)

5.6 PROPOSIÇÃO DA MELHOR ALTERNATIVA DE PROJETO

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 as 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 C_5 como quarto de maior peso, porém na agregação com uma importância de 0,070 é ponderado como o de menor peso.

O critério C_4 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 C_1 .

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 C_4 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 C_1 e C_2 . O material também

apresenta o melhor resultado para o critério C_3 , quando comparado as demais alternativas.

O critério C_1 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 C_2 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 C_3 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 C_4 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 C_5 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 C_4 .

O critério C_6 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 C_3 .

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 multicritérios 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, onde a alternativa demonstra ser a mais resistente ao desgaste e com segundo menor custo, porém o método leva em consideração todos os critérios relevantes ao projeto, desta maneira 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 usabilidade, 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 a alternativa 14, que também apresenta o segundo menor custo e melhor resistência ao desgaste, porém é verificado que seu resultado é penúltimo mais distante do ideal na aplicação do método.

6.1 LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

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

ARAI, T.; BAKER, G.M.; BATES, E.C.; BECHERRER, B.A.; BELL, T. *et al.* ASM Handbook, **Heat-treating**, Vol. 4, 1991.

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

BERTSHER, B. **Reliability in Automotive and Mechanical Engineering**. 1^o Edition. Germany: Springer, 2008.

BOYER, H.E. **Practical Heat Treating**. 3^o Edition. USA: American Society for Metals: 1987.

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

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7^o Edição, Rio de Janeiro, RJ: **LTC**, 2008.

CARVALHO, D.R.; CATAPAN, D. C.; CRUZ, J. A. **Proposta para redução do desperdício de chapas de aço em uma empresa do ramo metalúrgico**. Brazilian Journal of Development. 2018.

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

FERRARINI, J. L. **Caracterização de matérias para os processos de estampagem**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de conformação mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre, 2004.

FILO, G.; DOMAGAŁA, J.; DOMAGAŁA, M.; LISOWSKI, E.; MOMENI, H. **The idea of fuzzy logic usage in a sheet-based FMEA analysis of mechanical systems**. MATEC Web of Conferences. 2018.

FOGLIATTO, F.S.; RIBEIRO, J.L.D.; **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro, RJ: **Elsevier**, 2009.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2014.

Hu, J.; Marciniak, Z.; Duncan, J. **Mechanics of sheet metal forming**. Elsevier. 2002.

HWANG, L.C.; YOON, K. **Multiple attribute decision making**. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 1981.

JUNIOR, I.B.; CAVERSAN, E.G. **Tecnologia em Estampagem 1 – Corte**. Fatec Sorocaba: 2012.

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

KERAN, Z.; MATH, M.; GRIZELJ, B. Experimental and numerical analysis of coining process using microforming approach. **Tehnicki vjesnik-Technical Gazette**, v. 18, n. 4, p. 505-510, 2011.

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 – 301, 2008.

LOOTSMA, F. A. **Multi-Criteria Decision Analysis via Ratio and Difference Judgement Applid Optimization**. 1^o ed. The Netherlands: Kluweer Academic Publisher 1999.

MARQUES, A.; DUTRA, A.; BOFF, U.; SHAEFFER, L. Uso de software CAD 3D no desenvolvimento de ferramenta de dobra. **Corte & Conformação de Metais**. Março, 2013.

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

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.H. **Engineering Desig**. 3 ed. Germany: Springer, 2007.

REICHERT, L. J. **Avaliação de sistemas de produção de batata orgânica em propriedades familiares: uma aplicação da metodologia multicritério de apoio à decisão (MCDA)**. Dissertação (Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

REZENDE, A.; SOUZA, H., VII Inventário do parque de máquinas para corte e conformação de metais. **CMM**, nº 140, 2016.

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.

SILVA, A.V.C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3^o ed. São Paulo: Edgar Blucher, 664, 2010.

SOUZA, J.H.C., **Estudo do Processo de Corte de Chapas por Cisalhamento**. Porto Alegre: UFRGS, Tese para o título de Mestre em Engenharia, PPGEM, Centro de Tecnologia da Escola da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

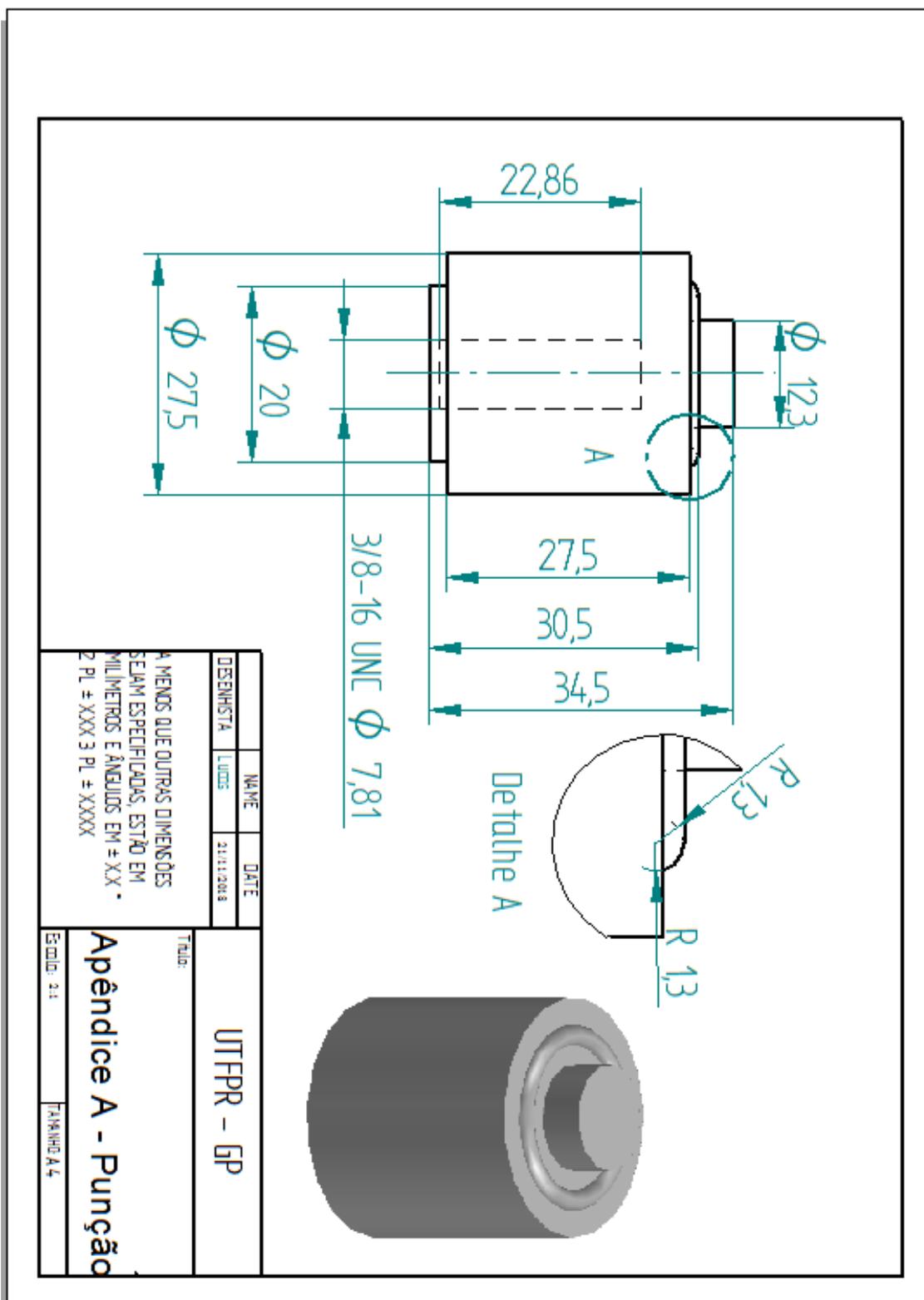
TZENG, G.H.; HUANG, J.J. **Multiple Adecision Making: Methods and Application**. 1^o Edition. New York: CRC Press, 2011.

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

ZARDARI, N. H.; AHMED, K.; SHIRAZI, S.M.; BIN, Z. **Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management**, Springer International Publishing, 2015.

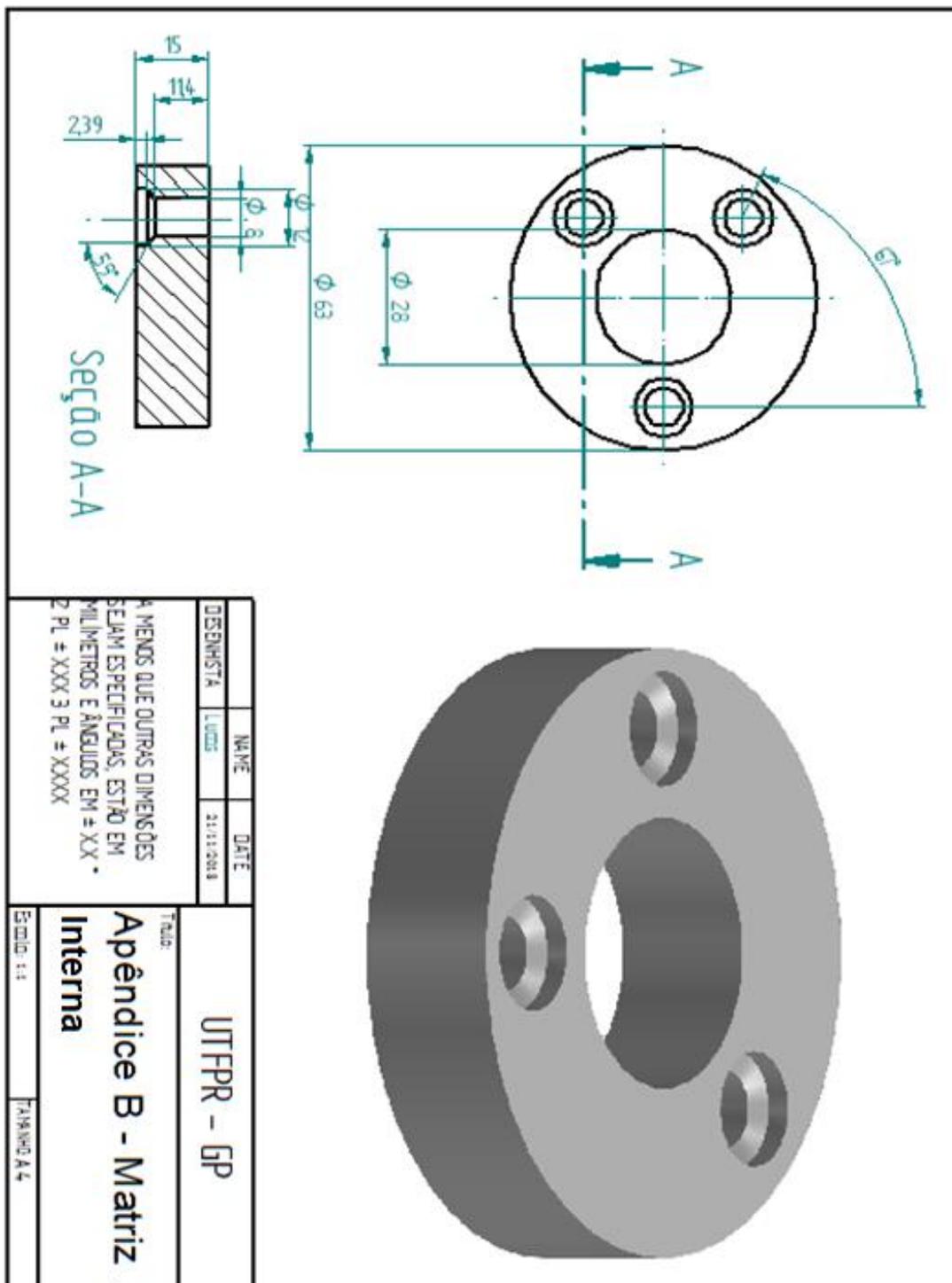
ZELENY, M. **The Theory of the Displaced Ideal. Multiple Criteria Decision Making Kyoto**, Springer-Verlag Berlin · Heidelberg, p.153–206. 1976.

APENDICE A – DESENHO TÉCNICO PUNÇÃO



Fonte: Autoria própria (2018)

APENDICE B – DESENHO TÉCNICO MATRIZ EXTERNA



Fonte: Autoria própria (2018)

APENDICE C – DESENHO TÉCNICO MATRIZ EXTERNA REDIMENSIONADA

SOLID EDGE ACADEMIC C

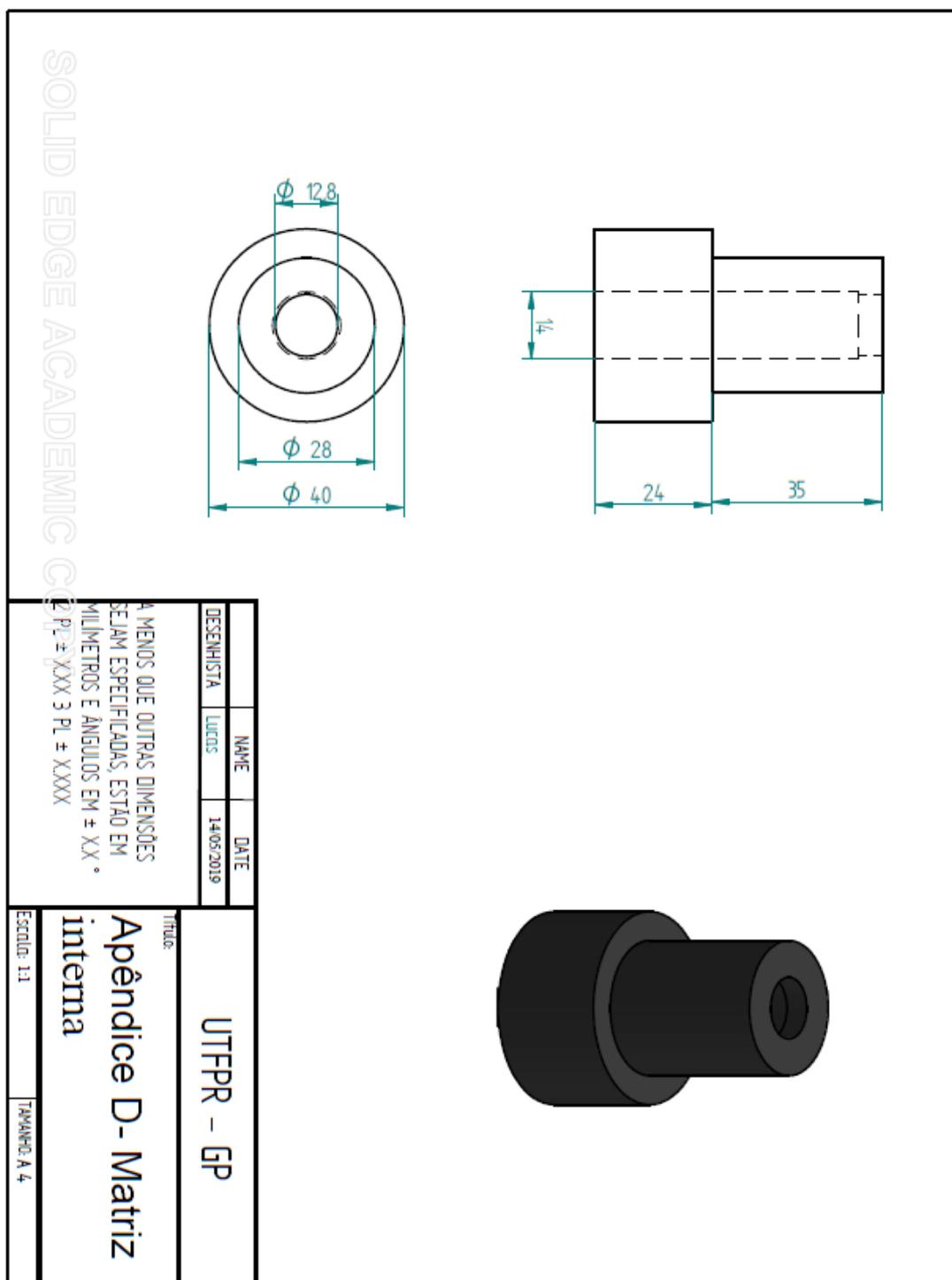
DESENHISTA	NAME	DATE
LUCAS		14-05-2019

A MENOS QUE OUTRAS DIMENSÕES SEJAM ESPECIFICADAS, ESTÃO EM MILÍMETROS E ÂNGULOS EM °
2 PL ± XXX 3 PL ± XXXX

TÍTULO	UTFPR – GP
Apêndice C - Matriz externa modificada	
Escala: 1:1	TABUADA: A 4

Fonte: Autoria própria (2019)

APENDICE D – DESENHO TÉCNICO MATRIZ INTERNA



Fonte: Autoria própria (2019)