

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA (COEME)
ENGENHARIA MECANICA**

THIAGO FLORE JUNQUEIRA ALVES

**SELEÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE MICROFUROS EM
INCONEL 718 POR MEIO DO MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO
POR MÚLTIPLOS CRITÉRIOS SAW**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2020

THIAGO FLORE JUNQUEIRA ALVES

**SELEÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE MICROFUROS EM
INCONEL 718 POR MEIO DO MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO
POR MÚLTIPLOS CRITÉRIOS SAW**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em engenharia mecânica, do (nome do Departamento / Coordenação), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Ms. Luis Fernando Paulista Cotian

Co-orientador: Prof. Ms. Ricardo Vinícius Bubna Biscaia

GUARAPUAVA

2020



TERMO DE APROVAÇÃO

SELEÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE MICROFUIROS EM INCONEL 718 POR MEIO DO MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO POR MÚLTIPLOS CRITÉRIOS SAW

THIAGO FLORE JUNQUEIRA ALVES

Este Trabalho de conclusão de curso foi apresentado em 03 de Julho de 2020 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.

Luis Fernando Paulista Cotian
Prof. Orientador

Alamo Alexandre Da Silva Batista
Membro Da Banca

Aldo Przybysz
Membro Da Banca

Aldo Przybysz
Coordenador do curso de Engenharia Mecânica

Thiago Flore Junqueira Alves

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado forças para conseguir alcançar meus objetivos. À minha mãe Zélia e minha vó Lucia pelo apoio, carinho e pelo incentivo nas tomadas de decisão que realizei. Agradeço especialmente a minha namorada Daniele, que sempre esteve ao meu lado, me ajudando nos momentos mais difíceis que tive durante essa jornada, sempre me motivando e sendo compreensiva na minha constante ausência.

Ao meu professor e orientador, Luis Cotian, pelo empenho, incentivo, paciência e amizade, que tornou possível a elaboração do presente trabalho.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela oportunidade.

A todos os meus amigos que de alguma forma puderam participar e me ajudar a concluir mais essa etapa.

A todos o meu muito obrigado.

RESUMO

ALVES, Thiago Flore Junqueira. **Seleção do processo de fabricação de microfuros em inconel 718 por meio do método de tomada de decisão por múltiplos critérios SAW.** 2020. 56. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2020.

As palhetas são componentes fundamentais das turbinas termoelétricas e passam por diversas etapas de fabricação, entre essas etapas está a obtenção de microfuros. Os microfuros podem ser obtidos por diversos processos de fabricação, dentre eles estão os processos de furação por eletro erosão e furação a laser por trepanação. O objetivo do presente trabalho foi utilizar o método de tomada de decisão por múltiplos critérios SAW para a seleção do processo de fabricação de microfuros em inconel 718. Realiza-se, então, uma pesquisa através de uma revisão bibliográfica nas bases de dados CAPES, pubmed e SciELO. Diante disso, foi aplicado o método SAW para a ordenação do melhor processo de furação para a obtenção do microfuro em inconel 718, onde foi possível observar que o processo de furação a laser leva vantagem ao procedimento de furação por eletroerosão, quando se leva em conta apenas a TRM, rugosidade e dilatação do microfuro, a presente pesquisa limita-se ao período de 2019 a 2020.

Palavras-chaves: Inconel 718; Microfuros; Furação por eletroerosão; Furação a laser por trepanação; Tomada de decisão por múltiplos critérios; SAW.

ABSTRACT

ALVES, Thiago Flore Junqueira. **Selection of the micro hole manufacturing process in inconel 718 using the multi-criteria decision making method SAW.** 2020. 56. Undergraduate Thesis (Bachelor Degree in Mechanical Engineering) – Federal University of Technology - Paraná. Guarapuava, 2020.

The vanes are fundamental components of the thermoelectric turbines and go through several stages of manufacture, among these stages is obtaining micro holes. Several manufacturing processes can obtain the micro holes, among them are the processes of electro-erosion drilling and laser drilling by trepanning. The objective of the present work was to use the decision-making method by multiple SAW criteria for the selection of the micro hole manufacturing process in inconel 718. Then, a search is carried out through a bibliographic review in the CAPES databases, pubmed and SciELO. Therefore, the SAW method was applied to order the best drilling process to obtain the micro hole in inconel 718, where it was possible to observe that the laser drilling process takes advantage of the drilling procedure by electro-erosion, when taking into account only TRM, roughness and dilation of the micro hole, this research is limited to the period from 2019 to 2020.

Keywords: Inconel 718; Microholes; Drilling by electroerosion; Laser drilling by trepanning; Multiple Criteria Decision Making; SAW.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Pás de turbinas a gás.....	13
Figura 2- Estrutura do trabalho.....	17
Figura 3: Fonte de emissão laser	19
Figura 4- Classificação das diferentes tecnologias de furação e avaliação de acordo com o tempo de furação e precisão.	20
Figura 5 - Principais elementos construtivos de um equipamento de usinagem por eletroerosão.	21
Figura 6 – Análise por MEV.....	23
Figura 7 – Estruturas que compõem uma superfície.....	25
Figura 8 – Circularidade	28
Figura 9 – Cilindricidade.....	28
Figura 10 – Concentricidade	29
Figura 11 - Fluxo dos passos para a execução do presente trabalho	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Gráfico da distribuição das trincas na superfície.	24
Gráfico 2- Variação da rugosidade por eletroerosão com eletrodos de cobre e latão.	26
Gráfico 3-Variação da rugosidade na furação a laser.	27
Gráfico 4- Comparação da TRM para furação por eletroerosão.	30
Gráfico 5 – Comparação da TRM para furação a laser por trepanação.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Furação por eletroerosão com eletrodo de latão	44
Tabela 2 – Furação por eletroerosão com eletrodo de cobre	44
Tabela 3- Furação a laser por trepanação	45
Tabela 4 – Resultados quantitativos dos furos.....	46
Tabela 5 – Matriz normalizada.	47
Tabela 6- Pesos w_j	47
Tabela 7- Valores normalizados e ponderados da matriz de decisão	48
Tabela 8- Número normalizado agregado dos três decisores e ordenação do melhor processo de furação.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

AHP	Analytic hierarchy Process
ANP	Analytic Network Process
SAW	<i>Simple Additive Weighting</i>
ECM	<i>Electro chemical machining</i>
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
ELECTRE	Elimination et choix traduisant la Réalité
MAUT	Multiple Attribute Utility Theory
MCDM	<i>Multiple Criteria Decision Making</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TRM	Taxa de remoção de material
ZAC	Zona afetada pelo calor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
1.2 JUSTIFICATIVA	15
1.3 ESTRUTURA	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE MICROFUROS EM SUPER LIGAS.....	18
2.1.1 Furação a Laser.....	19
2.1.2 Furação por Eletroerosão	21
2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS FUROS.....	25
2.2.1 Rugosidade.....	25
2.2.2 Circularidade.....	28
2.2.3 TRM – Taxa de remoção de material.....	29
2.2.4 Dilatação.....	32
2.2.5 Micro trincas.....	32
2.3 MCDM–MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO COM MÚTIPLoS CRITÉRIOS	33
2.3.1 – Normalização	34
2.3.2 Ponderação.....	35
2.3.3 SAW.....	35
3 METODOLOGIA	37
3.1 ESTABELECIMENTO DOS CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DO PROCESSO DE FURAÇÃO	38
3.2 DEFINIÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO COM AS COMBINAÇÕES DE PARÂMETROS.....	38
3.3 DEFINIÇÃO DO MODELO DE DECISÃO.....	39
3.4 APLICAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO E DO MÉTODO DE PONDERAÇÃO	39
3.5 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DECISÃO	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5 CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

As usinas termoelétricas são instalações industriais utilizadas para a geração de energia elétrica, através de um processo em que a energia é liberada a partir de diversos tipos de combustíveis renováveis ou não renováveis.

Basicamente, nas termoelétricas, a caldeira é aquecida com água e assim produz vapor, o qual, em alta pressão, move as pás da turbina do gerador. Após ter movimentado as turbinas, o vapor é conduzido a um condensador que será resfriado para ser reutilizado em um novo ciclo. Os componentes fundamentais de uma turbina são, a carcaça da turbina, diafragma da turbina, selo, eixo da turbina, discos e palhetas móveis (STUCHI, 2015).

As palhetas da turbina passam por diversas etapas de fabricação. Segundo Klocke et. al. (2014), dentre essas etapas está a obtenção de microfuros, que estão na faixa de 0,18 a 2mm, presente nestes componentes, como pode ser visto na Figura 1. Estes microfuros, auxiliam no aumento da resistência térmica destes componentes e ajudam no arrefecimento dessas pás. O arrefecimento dos componentes, por meio da passagem de um gás através dos furos, remove calor por convecção. A microfuração pode ser obtida por diversos processos, sendo basicamente quatro métodos principais: Eletroerosão, eletroquímica, furação a laser ou processos de furação mecânica.



Figura 1– Pás de turbinas a gás
Fonte: Naeem e wakeham (2010)

Dentre esses tipos de processos existem variáveis que influenciam diretamente na seleção do método de obtenção dos microfuros, como produtividade, acabamento, necessidades ou não de retrabalhos, custos envolvidos, entre outras variáveis. Visto isso, percebe-se a necessidade de estabelecimento de correlações entre as diversas respostas de cada processo, para que a seleção do processo ideal para determinadas necessidades de um projeto seja satisfeita da melhor forma.

Para que seja escolhido o melhor processo de fabricação dos microfuros, existem técnicas de tomada de decisão que envolvem múltiplos critérios. Esses critérios podem ser a rugosidade, circularidade, taxa de remoção de material, dilatação, micro trincas e também o custo para fabricação. Eles ainda podem ser parâmetros para seleção dentro de um sistema complexo, ou seja, que as alternativas têm resultados conflitantes. Os parâmetros conflitantes ocorrem quando se deseja considerar dois critérios, simultaneamente, como custos e qualidade da microfuração. Um problema de decisão do tipo multicritérios, geralmente envolve a escolha de um número finito de alternativas baseadas num conjunto de critérios selecionados.

Segundo Marins (2010) a tomada de decisão com múltiplos critérios (MCDM – *Multiple Criteria Decision Making*), conforme definição da *International Society on MCDM* (2009), se trata do estudo da inclusão de critérios conflitantes na tomada de decisão. Dentre os vários métodos de MCDM, podem ser citados alguns como: AHP – *Analytic hierarchy Process*, ANP – *Analytic Network Process*, ELECTRE – *Elimination et choix traduisant la Réalité*, MAUT – *Multiple Attribute Utility Theory*, TOPSIS – *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* e o método SAW – *Simple Additive Weighting*.

Esses métodos podem ser classificados em compensatórios e não compensatórios. O primeiro grupo, também conhecido como escola americana, assume que o decisor é capaz de apontar suas preferências racionalmente, neste grupo existe uma função de preferência que tem como objetivo agrupar os diversos critérios em um único critério de síntese. Tal abordagem considera a transitividade de preferências e indiferenças, porém exclui a incomparabilidade (Gomes et al, 2002). Já os métodos não-compensatórios, conhecido como escola Francesa ou Europeia, consideram a incomparabilidade entre as alternativas, evitando o favorecimento de alternativas que possuem um excelente desempenho em um critério, mas que sejam fracas nos demais (ALMEIDA, 2011).

Portanto existe grande variedade de métodos que auxiliam na tomada de decisão, podendo ser escolhido alguns desses métodos, para que se possa fazer a melhor seleção de processo para obtenção dos furos nas pás da turbina. Por meio da análise do acabamento e dimensão do furo obtido e da avaliação da produtividade, pode-se traduzir em respostas que indicariam vantagens, desvantagens e limitações de cada um dos processos, evidenciando qual a melhor combinação de parâmetros de determinado método será a melhor alternativa.

Desta forma, o presente trabalho tem por finalidade utilizar o método de tomada de decisão por múltiplos critérios a fim de responder o seguinte questionamento: **Qual o melhor processo de furação para microfuros em Inconel 718?**

1.1 OBJETIVO GERAL

Utilizar o método de tomada de decisão por múltiplos critérios SAW para a seleção do processo de fabricação de microfuros em inconel 718 obtidos por eletroerosão de furo rápido e laser por trepanação.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os critérios de acordo com a literatura na seleção do processo de fabricação dos microfuros;
- Ponderar os critérios;
- Definir o modelo da matriz de decisão com as alternativas e critérios;
- Aplicar o método SAW para ordenação das alternativas propostas;

1.3 JUSTIFICATIVA

A tomada de decisão está integrada na vida cotidiana, mas também é uma atividade complexa, que por vezes deve considerar variáveis controversas, onde para escolher as alternativas, são levados em conta os valores e pesos diferentes dessas

alternativas, dentro de um universo de fatores múltiplos, direta ou indiretamente relacionados.

Com a utilização de um método que auxilie na tomada de decisão é possível minimizar o erro e fazer a melhor escolha para diversos tipos de processos de fabricação.

Segundo Biscaia (2016) na microfuração por eletroerosão e na furação a laser por trepanação são obtidos resultados como a taxa de remoção de material (TRM), que está associada à produtividade do processo, ou seja, quanto maior a TRM, melhor é a produtividade do processo. Por outro lado, avalia-se também o tempo e o consumo de energia na execução do processo. Sendo consideradas variáveis que impactam negativamente na seleção do processo de fabricação, ou seja, quanto maior o tempo e o consumo de energia, menor é a eficiência do processo.

Quando se analisa este exemplo percebe-se a necessidade de se utilizar técnicas de tomada de decisão que envolvem a resolução desta atividade complexa com critérios controversos. Desta forma, a escolha do processo de obtenção dos microfuros é embasada em critérios de respostas técnicas avaliadas e organizadas de acordo com uma ordenação conforme necessidades do projeto.

Portanto, a proposta de um método para a escolha de um processo de microfuração, facilitaria na tomada de decisão pois esta seria baseada em critérios fundamentais que possibilitariam a redução de custos e aumento de produtividade, de acordo com pesos e opiniões de decisores em relação às necessidades do projeto.

1.4 ESTRUTURA

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, estruturando-se conforme a Figura 2.

O capítulo 1 aborda o problema de pesquisa, os objetivos gerais e específicos e também a justificativa.

No capítulo 2 está contido a revisão de literatura de processos de fabricação de microfuros. Posteriormente são explicados os fatores que influenciam na qualidade do furo. Por fim mostra os métodos de tomada de decisão com múltiplos critérios, abordando os conceitos de normalização, ponderação e do método SAW.

O capítulo 3 detalha o procedimento metodológico para a escolha do processo de microfuração em inconel 718, utilizando o método multicritério SAW.

O capítulo 4 contém os resultados dos furos em inconel 718 com o processo de eletroerosão de furo rápido e a laser por trepanação, aplicação do *Critic Method* e a classificação dos microfuros para pás de turbinas termoelétricas.

O quinto e último capítulo aborda as análises dos objetivos, os resultados obtidos no presente trabalho além de sugestões para trabalhos futuros.

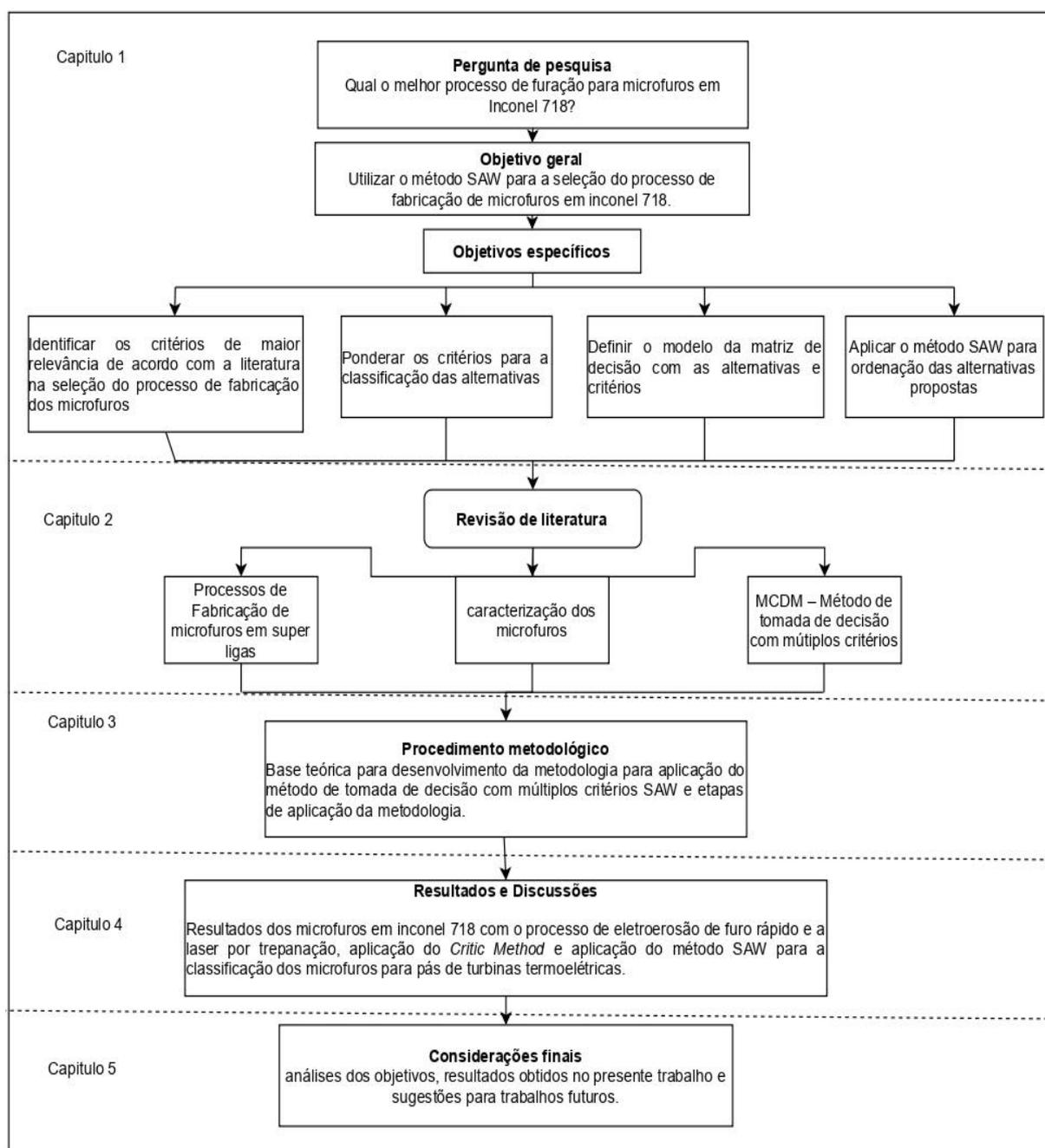


Figura 2- Estrutura do trabalho
Fonte: autoria própria (2020)

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo traz a contextualização de processos de fabricação de microfuros, sendo eles a furação a laser, furação a eletroerosão, processo eletroquímico e processo mecânico. Posteriormente são explicados os fatores que influenciam na qualidade do furo, como a rugosidade, circularidade, dilatação e micro trincas. Por fim mostra os métodos de tomada de decisão com múltiplos critérios, abordando os conceitos de normalização, ponderação e do método SAW.

2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE MICROFUROS EM SUPER LIGAS

Entre os processos de fabricação de microfuros, percebe-se que existe a variabilidade na qualidade dos furos obtidos, bem como o custo de fabricação.

Os processos de furação a laser e furação por eletroerosão serão melhores abordados nos tópicos seguintes, pois foram os métodos utilizados para a obtenção do furo no inonel 718.

A usinagem eletroquímica que também é um processo não convencional de usinagem, ou seja, a remoção de material nesse processo não se dá por arranque de material por meios mecânicos abrasivos, mas sim pelas reações químicas que ocorrem no processo (SILVA, 2011).

Ainda segundo Silva (2011) este processo de usinagem é uma tecnologia que tem grande aplicação na usinagem de peças de grande dureza e/ou resistência ao cisalhamento. É um processo em que praticamente não há desgaste da ferramenta (eletrodo) e nem geração de calor, atrito ou contato direto na interface peça-ferramenta, o que preserva as características físicas e propriedades mecânicas de ambas.

Já o processo de fabricação mecânica, também conhecido por usinagem, consiste em remover o sobremetal de uma peça ou de um bloco de aço para obter um ou mais produtos. A peça adquire a forma, as dimensões e o acabamento pelo fato de o sobremetal estar sendo removido da peça. Porém esse tipo de processo de produção de microfuros não são indicados pois tem uma determinada vibração das máquinas, sendo assim, não obtém as tolerâncias exigidas pelo projeto.

2.1.1 Furação a Laser

A utilização da usinagem a laser é justificada por apresentar vantagens técnicas e econômicas se comparada a métodos tradicionais. Uma dessas vantagens é a possibilidade de usinar materiais com elevada dureza (acima de 400 HB), maior controle de acabamento superficial, e ainda possibilita alterações de propriedades térmicas superficiais que não são facilmente alcançáveis através de outros meios (BROWN; ARNOLD, 2010). O processo de usinagem a laser também tem a vantagem de realizar a usinagem sem contato mecânico com a peça usinada.

Para efetuar a furação a laser, deve-se considerar inúmeros parâmetros, como por exemplo o feixe de laser, potência, modo de funcionamento (contínuo ou pulsado), comprimento de onda da radiação, lentes, etc. Do ajuste dos parâmetros referidos anteriormente resultam as seguintes considerações: velocidade de corte, gás de assistência e material (características, refletividade, espessura, entre outros) (CALÓ, 2013). Abaixo é apresentado na Figura 3, uma fonte de emissão de laser e os principais componentes da fonte.

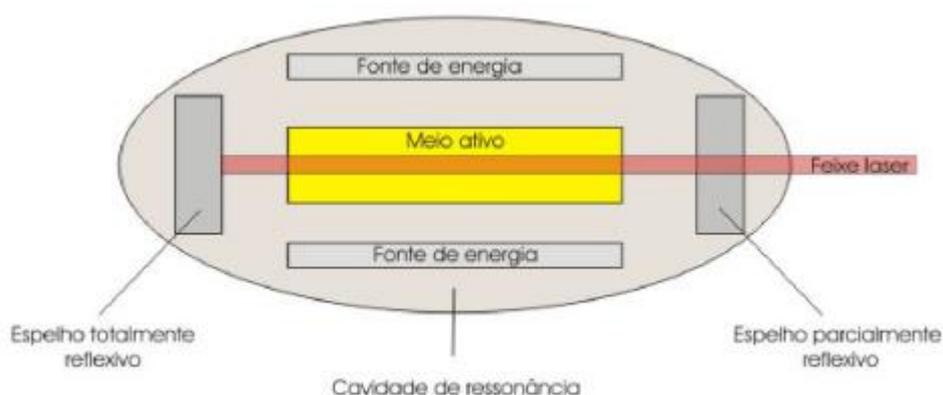


Figura 3: Fonte de emissão laser
Fonte: Masiero (2002)

O processo de furação a laser pode ser realizado de diferentes formas, como por pulso único, percussão, trepanação e furação helicoidal. A Figura 4 demonstra que a furação de pulso único é menos precisa, porém mais rápida. A furação helicoidal por outro lado é a mais precisa, porém demanda maior tempo de furação.

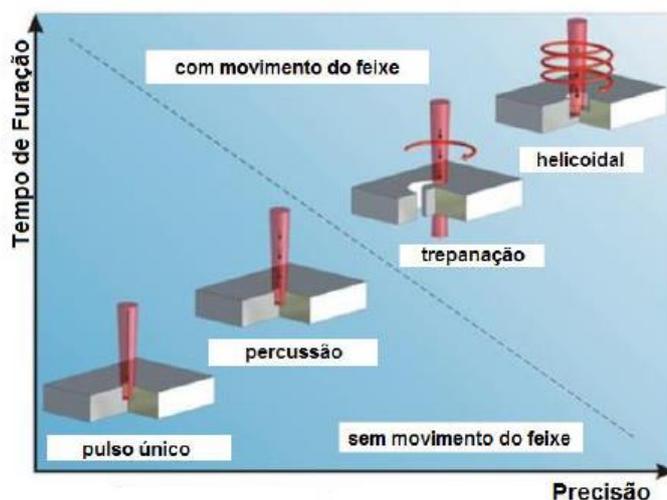


Figura 4- Classificação das diferentes tecnologias de furação e avaliação de acordo com o tempo de furação e precisão.

Fonte: Adaptado de Fornaroli, Holtkamp e Gillner (2013).

No processo de fabricação de microfuros a laser por trepanação, o feixe executa dois procedimentos distintos. Primeiramente o feixe pulsado trabalha sem movimento em relação a peça para realizar um furo com um diâmetro menor que o pretendido. Posteriormente o feixe se desloca radialmente executando um movimento circular, fabricando o furo com as dimensões requisitadas através do corte do material (SUCHATAWAT, 2011).

Segundo Suchatawat (2011), um parâmetro que deve ser controlado nessa técnica de furação é a velocidade tangencial do feixe. A velocidade tangencial está conexas ao tempo de permanência do feixe ao longo do perímetro do furo sendo usinado. Quanto maior for o tempo, menor será a velocidade tangencial, por conseguinte maior a energia para a remoção de material.

Outro parâmetro importante a ser citado é o tempo de pulso (TP). Ele apresenta grandes influências nas características dos furos obtidos. Esse parâmetro é o tempo que o feixe de laser incide na peça até ser descontinuado (MASIERO, 2002).

A energia de pulso é outro fator a ser considerado na furação a laser por trepanação. Este parâmetro, dada em Joules, retrata a quantidade de energia que o feixe de laser insere no sistema para realizar a fusão e vaporização do material para que este seja removido e assim o furo é fabricado (BISCAIA. 2016).

2.1.2 Furação por Eletroerosão

A eletroerosão é um processo térmico de fabricação caracterizado pela remoção de material consequente a sucessões de descargas elétricas que ocorrem entre um eletrodo e uma peça.

O processo de usinagem por descargas elétricas conhecida também por EDM – *Electrial Discharge Machining* ou simplesmente usinagem por eletroerosão é um processo que se dá por descargas elétricas altamente controladas pelos geradores das máquinas e ocorrem em pontos que são previamente determinados, removendo assim micropartículas de metal da peça usinada, transferindo a forma do eletrodo para a peça ou ainda recortando o perfil desejado (SCHMIDT, 2008).

Os principais componentes para esse tipo de processo de fabricação são mostrados na Figura 5 e mostra também o princípio de funcionamento do mesmo.

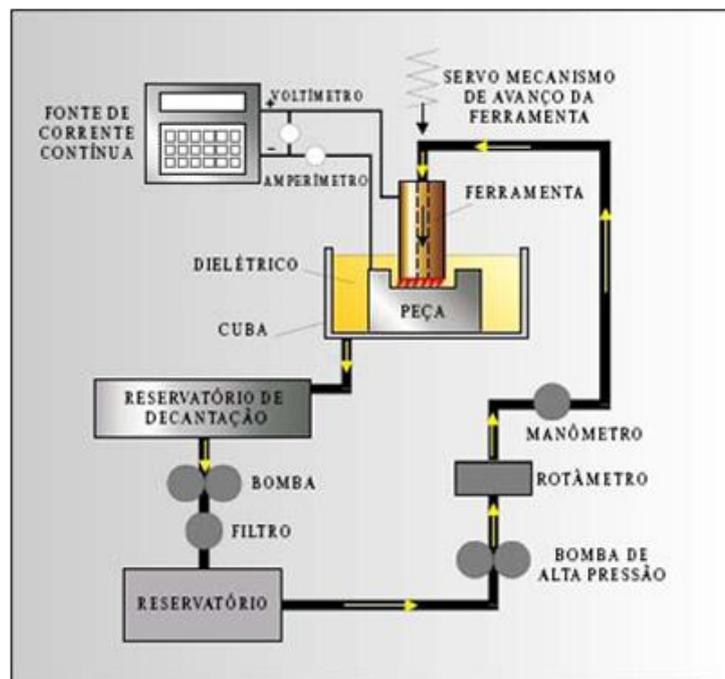


Figura 5 - Principais elementos construtivos de um equipamento de usinagem por eletroerosão.

Fonte: Moldes Injeção Plásticos.

As descargas elétricas de alta frequência provocam fusão e vaporização de materiais eletricamente condutores. Sendo assim, este processo é capaz de produzir furos, rebaxos e ranhuras entre outras geometrias complexas que, pelos processos

de usinagem convencionais, seria difícil ou até mesmo impossível de serem produzidos (OLINIKI, 2009).

Existem dois tipos principais de operações de usinagem por eletroerosão que são eletroerosão por penetração e eletroerosão de corte a fio, que são descritas a seguir:

- a) Eletroerosão por penetração: baseia-se na penetração do eletrodo na peça a ser usinada, ou seja, o eletrodo-ferramenta transfere a sua imagem ao eletrodo peça. Esse tipo de usinagem é geralmente aplicado na confecção de moldes com cavidades ou de ferramentais com geometria complexa (OLINIKI, 2009).
- b) Eletroerosão a fio: Nesse processo, como eletrodo-ferramenta, é utilizado um fio bobinado que se desenrola constantemente durante o processo, sendo a peça produzida pelo movimento relativo entre o fio e a peça. O princípio básico é semelhante ao da eletroerosão por penetração a diferença é que, neste processo, um fio eletricamente carregado, atravessa a peça submersa em água deionizada, em movimentos constantes, provocando assim descargas elétricas entre o fio e a peça (SCHMIDT, 2008).

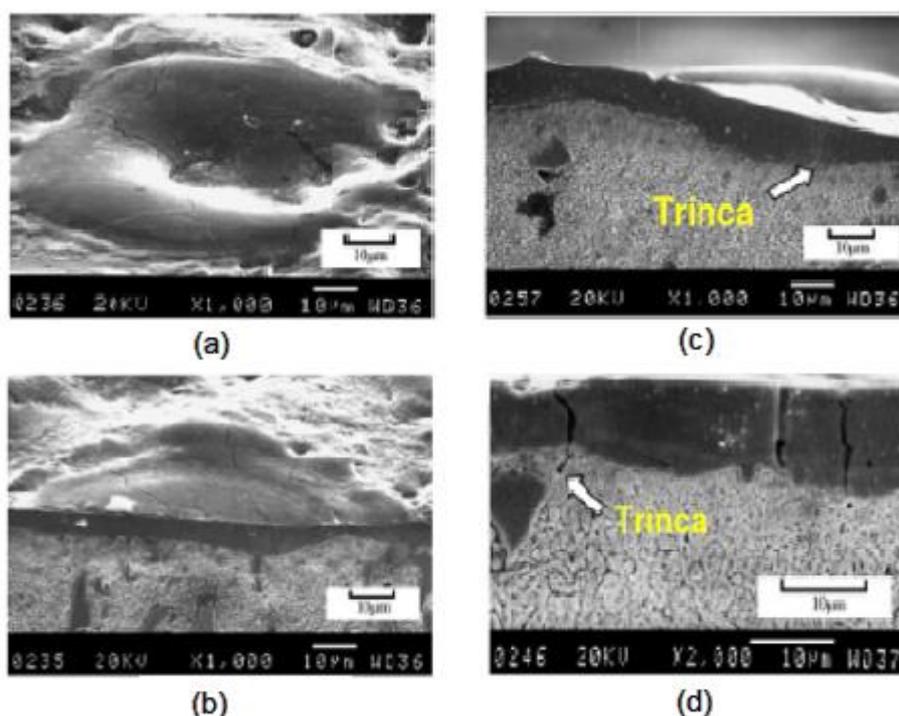
A eletroerosão de perfuração de pequenos furos, que é conhecida também como penetração de furo rápido, segundo Biscaia (2016), pode ser utilizada para perfuração de furos em pás de turbinas e furos de refrigeração em ferramentais de corte.

Assim como em outros processos de usinagem, é preciso que na eletroerosão os parâmetros sejam rigorosamente conhecidos e controlados visando a obtenção de condições otimizadas de usinagem.

Segundo Cruz (1989), os principais parâmetros do processo de usinagem por descargas elétricas são: o material do eletrodo-ferramenta, o eletrodo-peça e o fluido dielétrico, outros parâmetros também importantes são a tensão e corrente para esse processo de usinagem. O material do eletrodo-ferramenta causa uma variação significativa na rugosidade do microfuro, o eletrodo-peça afeta na alteração da dureza, que é originada pela dissipação do calor gerado na superfície, que depende da condutividade térmica do eletrodo-peça para ocorrer maior ou menor dissipação de calor. O fluido dielétrico influencia na formação da camada branca que é densamente infiltrada com carbono, onde uma parcela deste carbono é proveniente da evaporação do fluido dielétrico (OLINIKI, 2009).

Da máquina-ferramenta as principais variáveis de usinagem segundo Oliniki (2009), são: O tempo de pulso, a tensão do arco e a intensidade de corrente. Conforme Lee e Tai (2003) realizaram experimentos sobre os eletrodos-peça AISI D2 e AISI H13, onde pode verificar, que as durações dos tempos de pulso são os principais fatores que influenciam na rugosidade e espessura da camada branca e tensão residual.

Os ensaios de Lee e Tai (2003) mostraram fissuras na superfície usinada e micro-trincas que iniciavam na camada branca e propagam-se perpendicularmente ao substrato do material. Na maioria dos casos analisados por Le e tai, as micro-trincas se encerram na camada branca, ou apenas atingem a interface da camada branca e do substrato. Raramente essas micro-trincas penetram por toda a camada branca, como mostrado na Figura 6 a seguir:



**Figura 6 – Análise por MEV.
Fonte: Oliniki (2009)**

A Figura 6 mostra na imagem (a) as micro-trincas na superfície do material usinado por EDM, na imagem (b) é possível verificar as trincas iniciais na superfície, na (c) é mostrado as trincas no final da camada branca e por último na imagem (d) as trincas penetrando no substrato.

No estudo de Lee e Tai (2003), foi verificado que um pulso de corrente 3A até 16A com duração de 6 μ s até 16 μ s, à medida que diminui a corrente do pulso e aumenta a duração do pulso dentro dos intervalos citados a tendência por formação de micro-trincas aumentam. O Gráfico 1 mostra a variação da formação de micro-trincas na superfície em relação à corrente do pulso e a duração do mesmo:

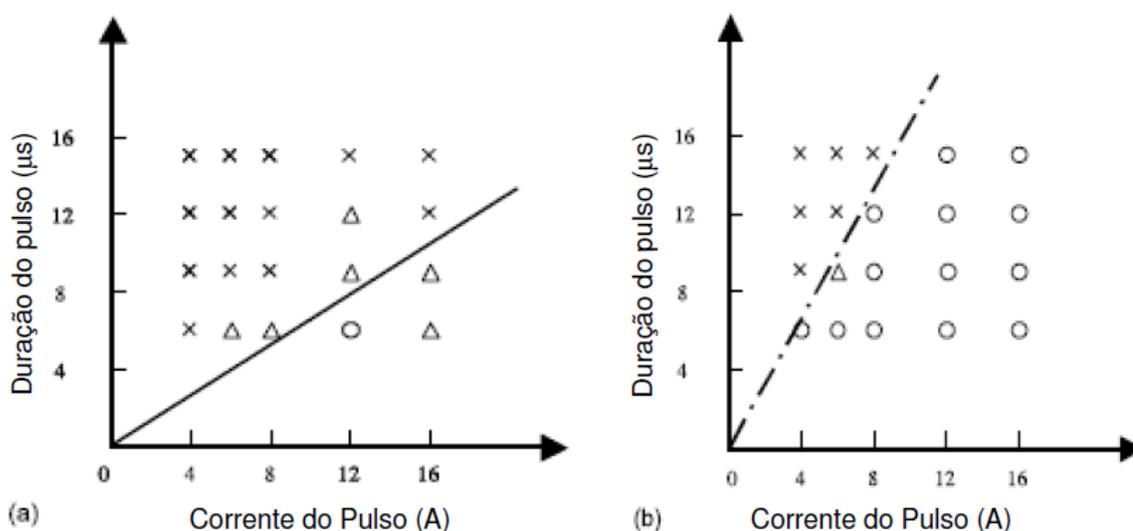


Gráfico 1- Gráfico da distribuição das trincas na superfície.
Fonte: Lee e Tai (2003)

Os gráficos acima apresentam as distribuições das trincas, variando-se a corrente do pulso e a duração do pulso, na superfície de material AISI D2 em (a) e material AISI H13 no gráfico (b). O símbolo x representa meio com sérias trincas, o Δ representa meio com poucas trincas e O retrata meio sem trincas.

Portanto o fator de serviço, corrente do pulso e tempo de pulso influem diretamente nos principais parâmetros de desempenho do processo, que são:

Taxa de remoção de material: É o volume de material retirado da peça por unidade de tempo e depende da energia empregada para um determinado regime de usinagem, quanto maior a energia de descarga maior será a taxa de remoção de material.

O sobre-corte lateral: é a diferença entre os raios do furo usinado na peça e do eletrodo-ferramenta. Este parâmetro origina-se da energia empregada em cada regime, da frequência de descarga, do sistema de limpeza e do material da peça.

Rugosidade: é o parâmetro que determina o acabamento final da peça. Esse parâmetro é função das variáveis de controle.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MICROFUIROS

No processo de obtenção do microfuro existem fatores que podem interferir e são levados em conta para analisar a qualidade do mesmo. A taxa de remoção do material, rugosidade e dilatação do furo, são algumas condições que serão utilizadas para a classificação dos diferentes furos obtidos.

2.2.1 Rugosidade

A qualidade superficial da peça usinada está relacionada a rugosidade da peça. Para a avaliação do acabamento, a rugosidade pode ser um parâmetro que auxilie na qualificação do furo obtido e o aumento da rugosidade superficial do furo pode ser indesejável, conforme as necessidades de acabamento exigidas (JOSSO, 2002).

De acordo com o estudo de Josso (2002) a rugosidade é o conjunto de irregularidades, formado por marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça. Os tamanhos e a distribuição espacial destas irregularidades têm papel importante no desempenho de peças e instrumentos. A rugosidade pode ser melhor apresentada na Figura 7 abaixo:

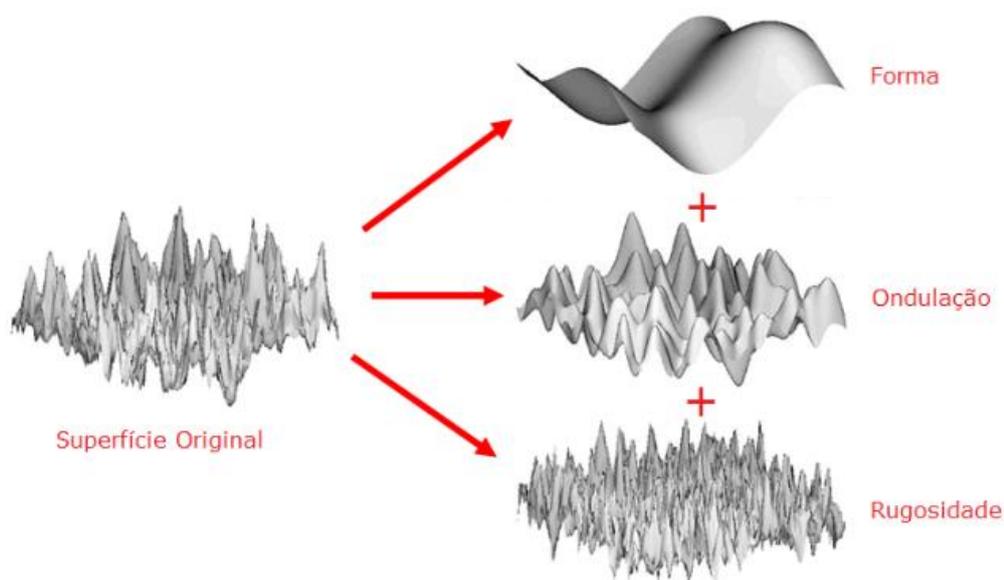


Figura 7 – Estruturas que compõem uma superfície
Fonte: Engenheiro de materiais

Segundo Bralla (1988), a habilidade das operações de usinagem para que se produza um acabamento específico dependem diretamente da ferramenta de corte, das características da peça, dos processos de usinagem, dos parâmetros de corte e do fluido de corte.

Conforme Alves (2002) existem três parâmetros usados para a caracterização da rugosidade, que possuem três classes conforme o tipo de medida em que se baseiam, que são:

- Parâmetros de amplitude: são determinados por alturas dos picos, profundidade dos vales ou os dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- Parâmetros de espaçamento: são determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.
- Parâmetros híbridos: são determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e espaço.

Entre os que utilizam medidas de distâncias verticais, ou de profundidade, encontram-se rugosidade média, desvio quadrático médio, rugosidade parcial e rugosidade máxima (ALVES, 2002).

Na micro furação realizada pelos processos de eletroerosão por penetração de furo rápido e pela furação a laser por trepanação, conforme BISCAIA (2016), a rugosidade dos furos obtidos pelo processo a laser apresenta menos rugosidade se comparados aos furos obtidos com a eletroerosão, como pode ser visto nos gráficos abaixo:

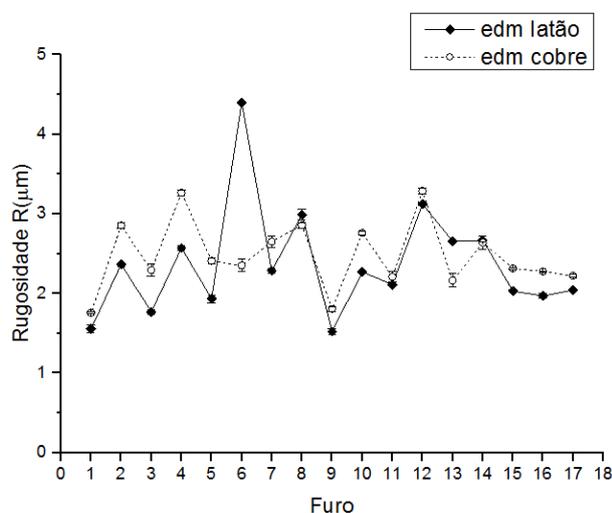


Gráfico 2- Variação da rugosidade por eletroerosão com eletrodos de cobre e latão.

Fonte: Biscaia (2016)

Segundo BISCAIA (2016) o Gráfico 2 mostra os níveis de rugosidade para o processo de furação por eletroerosão com eletrodos de latão e de cobre, o furo 6 apresenta o pico de rugosidade com o eletrodo de latão, enquanto o pico para o eletrodo de cobre se encontra nos furos 4 e 12. A menor rugosidade foi apresentada no furo 9, com eletrodo de cobre e latão.

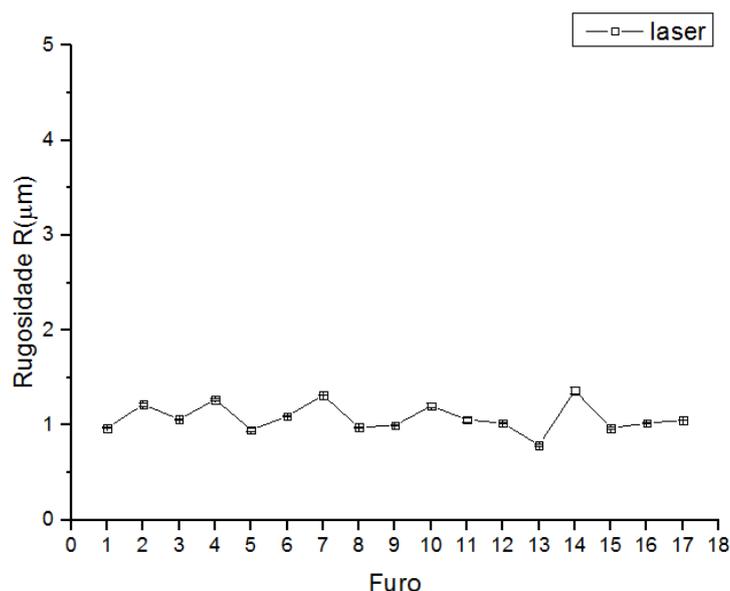


Gráfico 3-Varição da rugosidade na furação a laser.
Fonte: Biscaia (2016)

Conforme os estudos de BISCAIA (2016) a variação da rugosidade na furação a laser é pequena para as diferentes combinações de parâmetros de entrada, se comparado à variação na rugosidade dos furos obtidos com a eletroerosão.

Segundo Li et. al. (2013) na furação por eletroerosão quanto menor for a descarga de energia no processo, menor a rugosidade da superfície usinada por eletroerosão. Conforme Biscaia (2016), na furação a laser a variação da rugosidade é pequena para diferentes combinações de parâmetros de entrada nos níveis estabelecidos no planejamento experimental. Com variação da energia de 0,75 J a 1,05 J, não foi observado influência significativa na rugosidade. Quando a variação de energia foi de 0,6 J a 1,2 J a rugosidade teve um acréscimo que passou de $0,789 \pm 0,014 \mu\text{m}$ com a energia de 0,6 J para $1,364 \pm 0,034 \mu\text{m}$. Nos furos obtidos com eletroerosão a variação na rugosidade foi mais elevada sendo de $1,556 \pm 0,047 \mu\text{m}$ com corrente de 8A e $4,398 \pm 0,020 \mu\text{m}$ com corrente de 16A.

2.2.2 Circularidade

Os desvios geométricos são definidos como o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que os definem. Segundo Almeida (2008), na furação os principais desvios são os de circularidade, cilindridade e concentricidade.

A circularidade que é um dos tipos de variações da superfície. É a condição pela qual qualquer seção transversal deve estar dentro de uma faixa definida por dois círculos concêntricos e geometricamente perfeitos, distanciados por uma distância t , como na Figura 8. Essa distância t é a tolerância especificada pelo projeto do material.

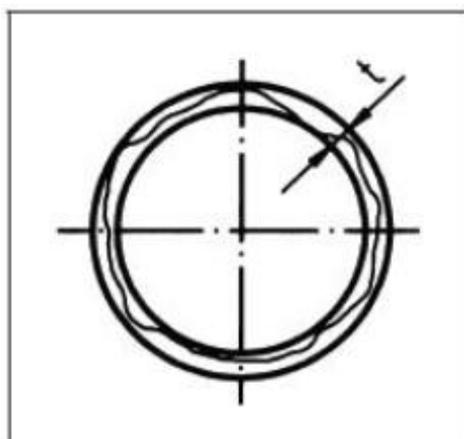


Figura 8 – Circularidade
Fonte: Adaptado Silva et al. (2004)

Na cilindridade a superfície considerada deve estar compreendida entre dois cilindros coaxiais cujos raios diferem de uma distância t , como mostrado na Figura 9 abaixo:

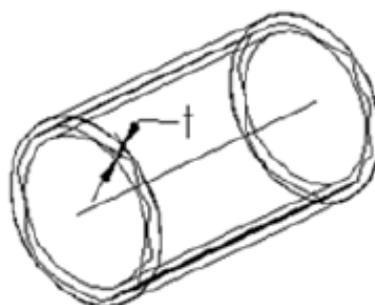


Figura 9 – Cilindridade
Fonte: Silva et al. (2004)

A circularidade é um caso particular de cilindridade, quando se considera uma seção do cilindro perpendicular à sua geratriz.

O desvio de concentricidade é quando o centro do círculo maior deve estar contido em um círculo com diâmetro de t mm, coaxial com o eixo de referência, que pode ser melhor explicado na imagem abaixo:

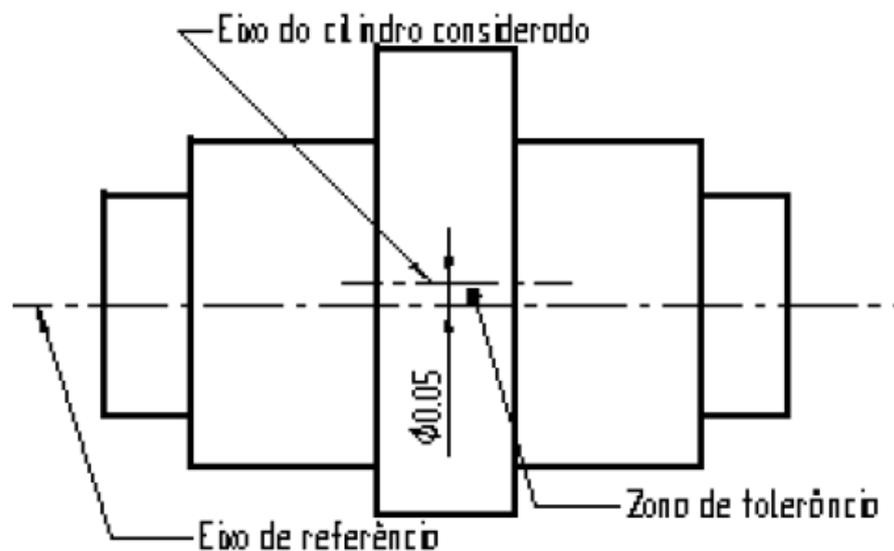


Figura 10 – Concentricidade
Fonte: Silva et al. (2004)

Portanto com as medições da circularidade, cilindridade e concentricidade, pode-se determinar uma qualidade para o furo produzido.

2.2.3 TRM – Taxa de remoção de material

A Taxa de remoção de material (TRM) é a quantidade de material removida por unidade de tempo. Cada processo de usinagem tem seu cálculo para esse parâmetro, ou seja, cada processo de usinagem ou micro furação é calculado de diferentes formas. Kuppan, Rajadurai e Narayanan (2008), constataram que a taxa de remoção de material aumenta quando se aumenta os picos de corrente o fator de serviço e a velocidade do eletrodo na micro furação por eletroerosão, já na micro furação a laser por trepanação a taxa de remoção de material aumenta se a corrente de descarga e o tempo de pulso forem maiores (AY, ÇAYDAS e HASÇALIK, 2012)

Nos gráficos abaixo estão os resultados referentes as taxas de remoção de material. No Gráfico 4 é compara a taxa de remoção de material para a furação por eletroerosão realizada com eletrodos de latão e eletrodos de cobre:

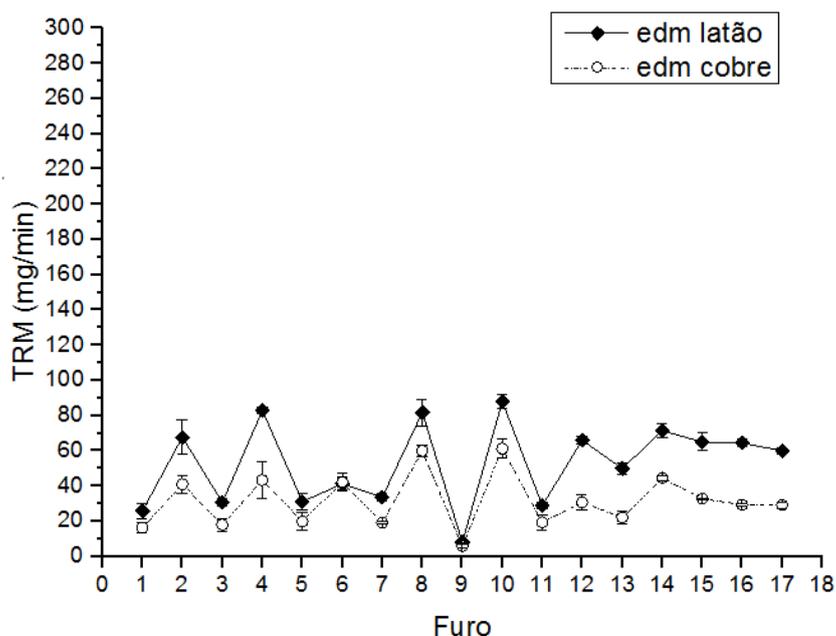


Gráfico 4- Comparação da TRM para furação por eletroerosão.
Fonte: Biscaia (2016)

Conforme os estudos de BISCAIA (2016), analisando apenas a influência do material de eletrodo, é possível observar que na furação realizada com eletrodo de latão a taxa de TRM obteve-se melhores resultados, para os mesmos níveis de parâmetros de eletroerosão, se comparado à furação com eletrodos de cobre, com a exceção do furo 6.

No Gráfico 5 estão apresentados os resultados referentes às taxas de remoção de material para a furação realizada por furação a laser por trepanação:

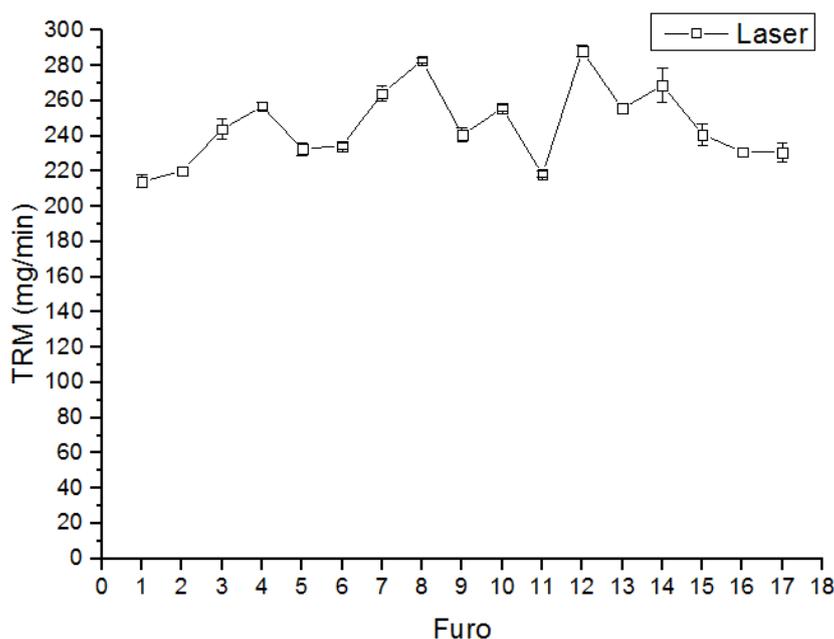


Gráfico 5 – Comparação da TRM para furação a laser por trepanação.
Fonte: Biscaia (2016)

Segundo Biscaia (2016), a taxa de remoção na furação a laser, são maiores que as taxas de remoção na furação por eletroerosão, isso se deve, principalmente, ao tempo de usinagem de cada processo. Na furação a laser, a velocidade de trepanação tem maior influência na TRM. A maior TRM acontece quando se tem maior velocidade de trepanação e com a velocidade de trepanação menor se obtém menor TRM.

Na furação por eletroerosão, a furação realizada com eletrodo de latão apresenta melhores resultados, quando comparado à furação com eletrodos de cobre. Um fator que pode ter influenciado para esses resultados é que os eletrodos de latão possuem menor condutividade térmica que eletrodos de cobre. Devido ao calor ser concentrado na peça com maior intensidade e dissipado com menor intensidade por condução no material do eletrodo de latão (Biscaia, 2016).

Kuppan, Rajadurai e Narayanan (2008) constataram que a taxa de remoção de material aumenta quando se aumenta os picos de corrente, fator de serviço e a velocidade do eletrodo. No entanto o aumento no pico de corrente afeta as condições da rugosidade dos furos.

2.2.4 Dilatação

Dilatação é o nome dado ao aumento ou diminuição do volume de um corpo ocasionado pelo aumento ou diminuição de sua temperatura.

No processo de furação a laser segundo Biscaia (2016), a energia de pulso é o parâmetro que tem maior influência na dilatação do furo. Assim como Hasçalik e Ay (2012), quanto maior a energia de pulso maior a dilatação. No corte a laser, também se observa a dilatação da região removida quando se aumenta a energia de pulso.

Em resultados encontrados por Hasçalik, et al. (2012), o aumento da velocidade de trepanação ocasionou a diminuição da exposição do material ao aquecimento e oxidação. Tal fato pode justificar a diminuição sensível da dilatação dos furos quando se aumenta a velocidade tangencial.

No processo de furação por eletroerosão, não se pode concluir que há diferença entre os valores das dilatações, quando feito com eletrodos de cobre e latão. Portanto, não é possível afirmar que o diâmetro real do eletrodo influenciou significativamente na dilatação do furo obtido (BISCAIA, 2016).

2.2.5 Micro trincas

Para a micro furação realizada pelos processos de eletroerosão por penetração de furo rápido e pela furação a laser por trepanação pode-se ter o surgimento de micro trincas nesses processos.

Segundo Biscaia (2016) o aumento de trincas superficiais é decorrente do aumento da energia de processo e do resfriamento rápido que ocorrem nos processos de fabricação por eletroerosão e laser.

Na furação a laser é possível verificar a variação na concentração das trincas variando-se a energia. Na furação por eletroerosão, as trincas apareceram nos furos que são obtidos com eletrodos de cobre e latão. Como a taxa de resfriamento através da pressão do fluido dielétrico é constante, quando se aumenta a energia através do aumento da corrente, aumenta o número de trincas presentes no material ressolidificado do interior do canal do furo (BISCAIA, 2016).

Se comparados os processos de fabricação a laser por trepanação e eletroerosão, pode ser verificado que no processo de eletroerosão a concentração de

trincas superficiais no interior do canal é menor. Com correntes a níveis baixos as trincas na furação a laser apresentam valores superiores aos furos obtidos por eletroerosão. Para os furos por eletroerosão com eletrodo de cobre que são fabricados com elevados níveis de corrente a concentração de micro trincas se torna equivalente à de furos obtidos a laser por trepanação (BISCAIA, 2016).

Portanto percebe-se que o nível de corrente afeta diretamente no surgimento de micro trincas no furo. Para furos feitos por eletroerosão, quanto maior o nível de corrente, maior será a concentração de micro trincas.

Cada processo de fabricação de microfuros tem diferença na qualidade dos furos. No processo de eletroerosão a concentração de micro trincas é menor se comparado ao processo a laser por trepanação, já a taxa de remoção de material é maior no processo de furação a laser. O preço de cada processo é outro fator que também são diferentes para obtenção do microfuro, todos esses critérios mencionados anteriormente são levados em conta para a obtenção do microfuro, sendo assim é preciso tomar a decisão de qual processo escolher.

2.3 MCDM – MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO COM MÚTIPLoS CRITÉRIOS

Diariamente enfrentamos várias decisões, que são tomadas por diversos critérios, e conseqüentemente estas decisões podem ser tomadas ao prover ponderações aos diferentes critérios, que podem ser definidos por experiências anteriores ou por meio de exemplos em casos similares podendo assim estar sujeito a erros maiores por não tomar a decisão mais adequada naquela ocasião.

Os métodos de tomada de decisão multicritério tem sido largamente utilizados ao longo das últimas décadas. Seu papel tem aumentado significativamente em diferentes áreas de aplicação, especialmente como novos modelos desenvolvidos e como melhorias dos já existentes (VELASQUEZ; HESTER, 2013).

É importante determinar a estrutura do problema e explicitar a avaliação multicritério. Não existem apenas questões muito complexas envolvendo multicritério, alguns dos critérios podem ter efeito sob algum problema singular, mas para obtenção da solução ótima, todas as alternativas devem ter critérios comuns, que claramente levam a decisões mais informadas e melhores (ARULDOSS et al., 2013).

Devido ao fato de todas as alternativas serem levadas em conta, as escalas de medidas de um modelo de tomada de decisão podem ser diferentes. Para a realização de comparações entre os critérios, faz-se necessária a utilização de uma escala comum, que é conhecida como normalização.

2.3.1 – Normalização

A normalização é o processo de transformar os valores de desempenho dos critérios de avaliação em uma mesma escala, que geralmente é uma escala de valores adimensionais no intervalo de 0 a 1 (JAHAN, 2015).

Segundo Chakraborty (2007), a normalização é um processo necessário em um método de decisão por múltiplos critérios (MCDM) para transformar classificações com diferentes unidades de medidas em uma matriz de decisão com unidades compatíveis.

Existem quatro métodos de normalização conhecidos usados no MCDM que são o vetor normalização, transformação linear da escala (método máx.-min), transformação linear da escala (método máx.) e transformação de escala linear (método da soma). A normalização de vetores e a transformação de escala linear, com o método de max-min, supera outros procedimentos de normalização quando usada com SAW (CHAKRABORTY, 2007).

Este método considera as classificações de desempenho mínimo e máximo dos atributos durante o cálculo. Este método tem a vantagem de que a escala de medição estará sempre em um intervalo entre 0 e 1 para cada atributo (CHAKRABORTY, 2007).

Um procedimento de agregação é então usado para combinar a matriz de decisão normalizada e atribui o peso W para atingir um valor de preferência geral para cada alternativa, no qual a classificação geral das alternativas é baseada, um processo conhecido por ponderamento.

2.3.2 Ponderação

O processo de ponderamento é um peso utilizado para aumentar determinadas grandezas, fazendo assim com que as mesmas adquiram maior ou menor relevância, sendo usado para aplicação em métodos de tomada de decisão.

Outra questão que foi levantada por Haidi-Vencheh e Aghajani (2013), é que os índices de ocorrência, severidade e detectibilidade não possuem pesos relativos diferentes para classificação dos riscos. Em alguns casos, seria importante ponderar tais índices, quando a gravidade de cada um deles difere significativamente.

Existem alguns métodos de ponderamento como a *Entropy*, *CRITIC method*, *Standard deviation method*, *Preference selection index*, entre outros métodos de ponderação, que tentam definir a importância dos critérios e podem ser categorizados em três grupos: método em que o papel de atribuir a importância para o critério é colocado pelos tomadores de decisão ou *designer*, métodos objetivos onde os tomadores de decisão não têm papel na determinação da importância dos critérios e a ponderação combinada que é um esquema dos dois grupos anteriores (JAHAN et. al. 2012).

As decisões multicritérios podem ser definidas pela avaliação das alternativas para a finalidade de seleção ou classificação, utilizando um número de critérios quantitativos e/ou qualitativos. Existem vários métodos de MCDM, da qual podem ser citados métodos como, AHP, TOPSIS e SAW (MARINS, 2010).

O método AHP é um método simples e confiável e tem aplicações em diferentes áreas, como em economia e problemas administrativos onde se encontra problemas em: *Design*, *Arquitetura*, *Finanças*, *Marketing*, *Benchmarking*, *Planejamento estratégico*, *Análise de investimentos*, entre outros. Para aplicações em Problemas Políticos, como: *Resolução de conflitos* e *Negociações*. Para problemas tecnológicos, tais como: *Seleção de mercado*, *tecnologia de transferência*, *seleção de fornecedores* e *qualidade total* (JUNIOR, 2006).

2.3.3 SAW

O método SAW (*Simple Additive Weighting*), conhecido também como o Método de Pontuação é um método simples para a técnica de decisão. O método é

baseado na média ponderada. Kabassi e Virvou (2004) o apontam como, provavelmente, o mais conhecido e mais usado, apresentando uma aplicação do método SAW na avaliação de um ambiente de aprendizagem inteligente. Cheng, Chan e Huang (2003), coloca o método SAW como o mais simples dos métodos multicritérios de apoio a decisão.

Conforme Rezende (2012), a técnica SAW consiste nas seguintes etapas:

- Normalizar os valores de utilidade das alternativas para torna-los comparáveis;
- Aplicar pesos a esses valores de utilidade;
- Somar os valores de utilidade de cada alternativa.

Segundo Afshari, Mojahed e Yusuff (2010), no método SAW tem uma pontuação de avaliação calculada para cada alternativa, multiplicando o valor escalado dado à alternativa desse atributo com os pesos de importância relativa diretamente atribuídos pelo tomador de decisão seguido pela soma dos produtos para todos os critérios.

Nesse método, portanto, é importante a aplicação da normalização, que transforma os valores de desempenho dos critérios de avaliação em uma mesma escala. Como se tem que aplicar os devidos pesos aos valores de utilidade, é necessário fazer o ponderamento dos índices. O ponderamento é o peso utilizado para que determinadas grandezas adquiram maior ou menor relevância.

Esse método SAW tem muitas aplicações nas questões ambientais segundo o estudo de Hajkowicz e Higgins (2006). Uma das principais vantagens segundo Chou et al. (2008), é que o método SAW apresenta o mais aceitável resultado para a maioria dos problemas de seleção de uma única dimensão.

3 METODOLOGIA

No presente trabalho foi utilizado o método SAW de tomada de decisão, para a escolha do melhor processo de furação. Empregando os resultados obtidos por Biscaia (2016), que foi realizado em sua dissertação a furação de Inconel 718 pelos processos de fabricação: eletroerosão por penetração de furo rápido e laser por trepanação.

A Figura 11 mostra o sequenciamento das etapas para execução do presente trabalho.

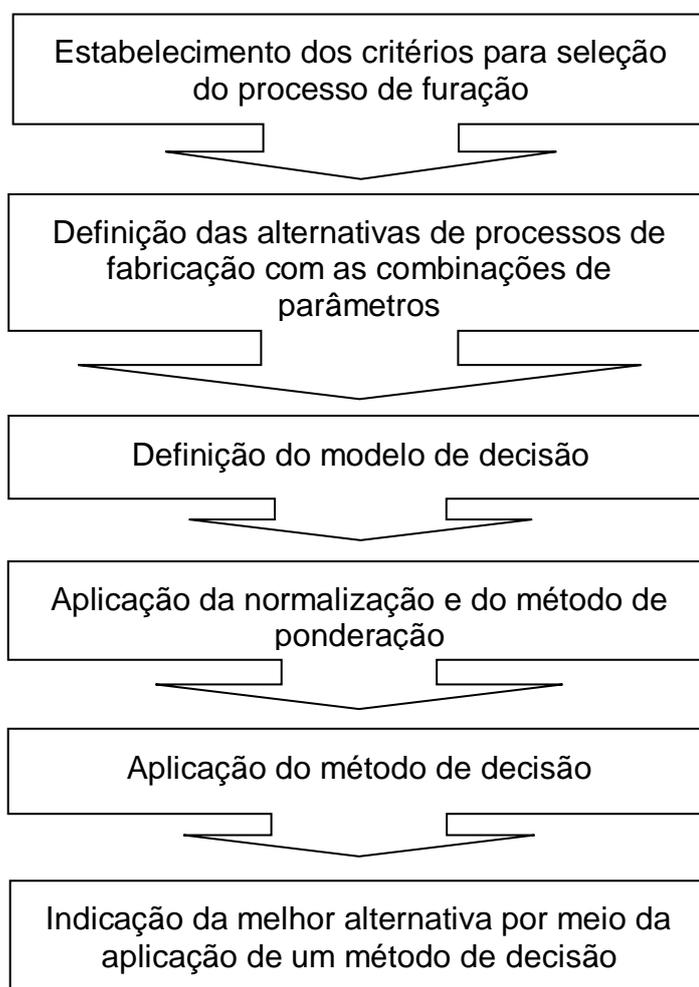


Figura 11 - Fluxo dos passos para a execução do presente trabalho

Fonte: autoria própria

3.1 ESTABELECIMENTO DOS CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DO PROCESSO DE FURAÇÃO

Foram analisados microfuros feitos com furação a laser e furação por eletroerosão. Sendo que a furação por eletroerosão foi feita com eletrodos de cobre e latão. Os microfuros analisados foram previamente produzidos por Biscaia (2016).

Após a obtenção do furo, as variáveis avaliadas na eletroerosão por penetração de furo rápido foram a corrente, tempo de pulso, fator de serviço e o material do eletrodo. Esses parâmetros no processo de usinagem dos microfuros são os que apresentam a maior influência na variação do acabamento, tempo de processo e dimensão dos furos obtidos (BISCAIA, 2016).

Após a obtenção do furo e com os valores da pesagem das amostras e cronometragem do tempo de cada furo fabricado, foi possível obter as taxas de remoção de material. A taxa de remoção de material pode ser calculada pela equação 1.

$$\text{Taxa de Remoção de Material} \left(\frac{mg}{min} \right) = \frac{\text{Massa Inicial (mg)} - \text{Massa Final (mg)}}{\text{Tempo de Usinagem (min)}} \quad (1)$$

As medições dos diâmetros foram obtidas através de imagens do microscópio eletrônico de varredura das amostras. Os diâmetros dos furos foram obtidos por meio da medição da superfície onde se inicia a usinagem.

A rugosidade do furo foi obtida através da técnica de medição de rugosidade por contato através de um rugosímetro. A rugosidade média do canal foi obtida através de três medições realizadas em cada canal.

3.2 DEFINIÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO COM AS COMBINAÇÕES DE PARÂMETROS

Os critérios encontrados para análise dos furos obtidos foram a rugosidade, taxa de remoção do material e dilatação do processo, os mesmos foram escolhidos com base nos resultados de Biscaia (2016). Os valores da rugosidade, TRM e dilatação, também foram obtidos por Biscaia (2016).

3.3 DEFINIÇÃO DO MODELO DE DECISÃO

A literatura estudada fornece auxílios para escolha de alguns métodos multicriteriais, onde pode ser avaliada a sua aplicação. Para o presente trabalho, um critério de grande importância para a escolha dos métodos é a simplicidade, pois o objetivo deste trabalho é utilizar um método de tomada de decisão por múltiplos critérios para a seleção do processo de fabricação de microfuros em inconel 718, obtidos por eletroerosão e laser por trepanação.

Portanto com base na literatura, foi escolhido o método SAW (Simple Addictive Weighting), por ser um dos modelos de decisão bastante utilizado e também pela sua simplicidade.

O método SAW possui características positivas e recursos, que segundo Podvezko (2011) pode-se apontar os seguintes:

- O algoritmo de cálculo do método não é complicado, podendo ser implementado sem a ajuda de um computador ou podendo ser aplicado com programas de computador muito simples.
- Os valores normalizados do critério SAW de avaliação s_j que ajuda a determinar visualmente as diferenças entre as alternativas comparadas.

Segundo Velasquez (2013), além de ser um método com uma ampla aplicabilidade, pode-se citar algumas vantagens como a simplicidade do cálculo por não requerer programas computacionais e ser intuitivo para os tomadores de decisão. Após a aplicação da normalização e atribuição de pesos de importância para cada critério, por meio do ponderamento, a alternativa com o resultado mais alto é selecionada como a preferida.

3.4 APLICAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO E DO MÉTODO DE PONDERAÇÃO

Para a ponderação dos resultados foi utilizado o método de ponderamento *CRITIC Method*, modelo proposto por Diakoulaki et al. (1995). Este método foi escolhido pois é um método que independe da opinião do decisor, ou seja, depende apenas da variabilidade dos dados do modelo de decisão analisado e também se

baseia em testes analíticos da matriz de decisão para determinar as informações contidas nos critérios pelos quais as variantes são avaliadas. Para cada critério definido, se traduz todos os valores dos critérios em intervalos de [0,1].

O passo a passo para realizar a ponderação para critérios objetivos é dado seguindo as seguintes etapas:

1° Etapa: Dada a matriz de decisão $A = [a_{ij}]$, obter a matriz normalizada $X = [x_{ij}]$, por

$$x_{ij} = \frac{a_{ij} - \min\{a_{ij}\}}{\max\{a_{ij}\} - \min\{a_{ij}\}} \quad (2)$$

2° Etapa: Para cada critério j determinar o desvio padrão σ_j , que é a matriz normalizada X :

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M_A)^2}{n}} \quad (3)$$

Sendo

: x_i = Valor na posição i no conjunto de dados

: M_A = média aritmética dos dados

: n = quantidade de dados

3° Etapa: Fazer a construção de uma matriz de critérios simétrica cujos elementos são os coeficientes de correlação linear entre o critério j e o critério k .

4° Etapa: Determinar para cada critério j a quantidade de informação C_j de cada critério, dada por

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad \text{Para todo } j \quad (4)$$

Onde o r_{jk} é o desempenho normalizado da alternativa i ($i=1,2, \dots, m$) em relação ao critério j ($j = 1, \dots, n$).

5º Etapa: Determinar os pesos w_j por meio de normalização

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k} \quad (5)$$

Então terá uma ordenação das alternativas, considerando o maior valor aquele que representa o maior risco e analogamente o menor valor representa o menor risco.

3.5 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DECISÃO

Definido o ponderamento, a matriz de decisão é processada por meio das etapas descritas na sequência. Para a ordenação da melhor ordem de classificação será utilizado o método SAW (*Simple Additive Weighting*). Um dos primeiros a utilizar esse método, foram Churchman e Ackoff (1954), que se baseia na média ponderada. Segundo Zanakis e outros (1998), o método SAW é muito popular entre os tomadores de decisão e Kabassi e virvou (2004) o apontam como, o mais conhecido e mais usado.

A resolução do método foi executada com o auxílio de planilhas eletrônicas. Seguindo o passo a passo mostrado a seguir:

1º Etapa: Define a matriz de decisão, apresentada na forma da matriz abaixo:

$$V = \begin{matrix} & \begin{matrix} (w_1 & w_2 & \cdots & w_N) \\ C_1 & C_2 & \cdots & C_N \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_M \end{matrix} & \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & \cdots & v_{1,N} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & \cdots & v_{2,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{M,1} & v_{M,2} & \cdots & v_{M,N} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

Onde: os valores $v_{i,j}$ são as avaliações de cada alternativa A_i , relativos aos critérios C_j da análise. Sendo M o número de elementos do conjunto das alternativas $A = [A_1, A_2, \dots, A_M]$ e N é o número de elementos do conjunto dos critérios $C = [C_1, C_2, \dots, C_N]$. Por fim, define-se o conjunto dos pesos referentes aos critérios $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]$.

2º Etapa: O método SAW pode ser utilizado se todos os critérios estiverem maximizando. Portanto os critérios que se deseja minimizar, pode ser facilmente convertido em maximizadores utilizando a formula 7 abaixo:

$$r_{i,j}^* = (v_j^{**} + v_j^*) - v_{i,j} \quad (7)$$

Onde o elemento v_j^{**} é o maior indicador das alternativas, com relação ao critério j e v_j^* é o menor indicador das alternativas, com relação ao critério j.

3º Etapa: Aplica-se a normalização da matriz de decisões inicial, que é feito pelas equações 8 e 9 abaixo:

$$r_{i,j} = \frac{v_{i,j}}{\sum_{i=1}^n v_{i,j}} \quad (8)$$

Ou,

$$r_{i,j} = \frac{r_{i,j}^*}{\sum_{i=1}^n r_{i,j}^*} \quad (9)$$

Para os critérios onde se deseja a maximização, é utilizada a Equação 8 e para critérios onde seja desejada a minimização, é utilizada a Equação 9.

4º Etapa: Após essas operações, sobre todos os elementos de V, gera então a matriz de decisão normalizada R:

$$R = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,N} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,N} \\ \vdots & & & \vdots \\ r_{M,1} & r_{M,2} & \cdots & r_{M,N} \end{bmatrix} \quad (10)$$

5° Etapa: Por fim, a geração da pontuação das alternativas, no método SAW, é dada pela expressão:

$$S_i = \sum_{j=1}^N w_j * r_{i,j} \quad (11)$$

Onde S_i é a pontuação da alternativa i , w_j é o peso do critério j . N é o número de critérios e $r_{i,j}$ é o valor normalizado do indicador da alternativa i com relação ao critério j .

6° Etapa: Faz-se a ordenação das alternativas analisadas, considerando as melhores alternativas as que obtiverem as maiores pontuações e as piores alternativas as que obtiverem as menores pontuações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados encontrados descrevem a ordenação do melhor processo de furação para os microfuros em Inconel 718. Para os resultados da taxa de remoção do material, rugosidade e dilatação do furo foram previamente obtidos por Biscaia (2016) *. A Tabela 1 traz os resultados médios quantitativos para a furação por eletroerosão com eletrodo de latão.

Tabela 1 – Furação por eletroerosão com eletrodo de latão

Furo: Latão	C (A)	TP (μ s)	FS (%)	TRM (mg/min) Média	Dilatação (μ m) Média	Rugosidade (μ m) Média
A1	8	20	50	25,8509	92,052	1,556
A2	16	20	50	67,6801	109,068	2,366
A3	8	40	50	30,6407	114,89	1,768
A4	16	40	50	82,8975	141,32	2,571
A5	8	20	70	31,0501	89,215	1,933
A6	16	20	70	41,2769	158,405	4,398
A7	8	40	70	33,4953	105,952	2,284
A8	16	40	70	81,7451	141,507	2,989

*Biscaia 2016: CARACTERIZAÇÃO DA MICROFURAÇÃO DE INCONEL 718 REALIZADA PELOS PROCESSOS DE ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO DE FURO RÁPIDO E PELA FURAÇÃO A LASER POR TREPANAÇÃO

Onde C representa a corrente, TP representa o tempo de pulso e FS representa o nível do fator de serviço.

Nesta tabela podemos observar que quanto maior a corrente maior a Taxa de remoção do material, tanto na furação por eletroerosão com eletrodo de latão como também na furação por eletroerosão com eletrodo de cobre apresentado a seguir.

Tabela 2 – Furação por eletroerosão com eletrodo de cobre

Furo: Cobre	C (A)	TP (μ s)	FS (%)	TRM (mg/min) Média	Dilatação (μ m) Média	Rugosidade (μ m) Média
B1	8	20	50	16,239	86,498	1,758
B2	16	20	50	40,8842	83,01	2,855
B3	8	40	50	17,8828	131,873	2,292
B4	16	40	50	43,2461	142,46	3,266
B5	8	20	70	19,8731	110,815	2,409
B6	16	20	70	42,1193	141,725	2,351
B7	8	40	70	19,1578	146,0,73	2,653
B8	16	40	70	59,861	459,895	2,858

*Biscaia 2016: CARACTERIZAÇÃO DA MICROFURAÇÃO DE INCONEL 718 REALIZADA PELOS PROCESSOS DE ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO DE FURO RÁPIDO E PELA FURAÇÃO A LASER POR TREPANAÇÃO

Onde C representa a corrente, TP representa o tempo de pulso e FS representa o nível do fator de serviço.

Segundo Li et. al. (2013) na furação por eletroerosão quanto menor for a descarga de energia no processo, menor a rugosidade da superfície usinada por eletroerosão. É possível observar esse resultado encontrado por Li et. al. nas tabelas 1 e 2 acima, quando se modifica apenas a corrente do processo e matem os valores de tempo de pulso e fator de serviço, a rugosidade com corrente de 8A é menor que a rugosidade obtida com corrente de 16A.

A Tabela 3 traz os resultados médios quantitativos da furação a laser por trepanação.

Tabela 3- Furação a laser por trepanação

Furo: Laser	TP (ms)	VT (mm/min)	E (J)	TRM (mg/min) Média	Dilatação (μm) Média	Rugosidad e (μm) Média
C1	0,35	55	0,75	214,1732	29,653	0,97
C2	0,45	55	0,75	202,1724	46,807	1,217
C3	0,35	65	0,75	243,777	30,007	1,061
C4	0,45	65	0,75	256,8073	34,023	1,27
C5	0,35	55	1,05	232,7187	78,747	0,949
C6	0,45	55	1,05	234,2985	114,74	1,093
C7	0,35	65	1,05	264,1876	95,3	1,316
C8	0,45	65	1,05	282,7698	83,8	0,976

*Biscaia 2016: CARACTERIZAÇÃO DA MICROFURAÇÃO DE INCONEL 718 REALIZADA PELOS PROCESSOS DE ELETROEROSÃO POR PENETRAÇÃO DE FURO RÁPIDO E PELA FURAÇÃO A LASER POR TREPANAÇÃO

Na furação a laser o TP representa o nível do tempo de pulso, VT o nível da velocidade tangencial e E o nível da energia de pulso.

Na Tabela 3 podemos observar que quanto maior a energia utilizada no processo de furação a laser por trepanação maior será a TRM na obtenção dos microfuros, mantendo os valores de TP e VT, e mesmo aumentando a energia do procedimento de furação a rugosidade dos microfuros diminuiram.

Os resultados obtidos foram estruturados de forma que os microfuros A são os obtidos por eletroerosão com eletrodo de latão, B eletroerosão com eletrodo de cobre e C os microfuros obtidos a laser por trepanação, sendo organizado da seguinte forma na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 – Resultados quantitativos dos furos

Furo	C (A)	TP (μ s)	FS (%)	TP (ms)	VT (mm/min)	E (J)	TRM (mg/min) Média	Dilatação (μ m) Média	Rugosidade (μ m) Média
A1	8	20	50				25,8509	92,052	1,556
A2	16	20	50				67,6801	109,068	2,366
A3	8	40	50				30,6407	114,89	1,768
A4	16	40	50				82,8975	141,32	2,571
A5	8	20	70				31,0501	89,215	1,933
A6	16	20	70				41,2769	158,405	4,398
A7	8	40	70				33,4953	105,952	2,284
A8	16	40	70				81,7451	141,507	2,989
B1	8	20	50				16,239	86,498	1,758
B2	16	20	50				40,8842	83,01	2,855
B3	8	40	50				17,8828	131,873	2,292
B4	16	40	50				43,2461	142,46	3,266
B5	8	20	70				19,8731	110,815	2,409
B6	16	20	70				42,1193	141,725	2,351
B7	8	40	70				19,1578	146,073	2,653
B8	16	40	70				59,861	459,895	2,858
C1				0,35	55	0,75	214,1732	29,653	0,97
C2				0,45	55	0,75	202,1724	46,807	1,217
C3				0,35	65	0,75	243,777	30,007	1,061
C4				0,45	65	0,75	256,8073	34,023	1,27
C5				0,35	55	1,05	232,7187	78,747	0,949
C6				0,45	55	1,05	234,2985	114,74	1,093
C7				0,35	65	1,05	264,1876	95,3	1,316
C8				0,45	65	1,05	282,7698	83,8	0,976

Fonte: Autoria própria

Com os resultados estruturados é possível verificar que os valores da taxa de remoção do material (TRM) é maior no processo de furação a laser por trepanação. Na rugosidade alguns furos têm valores próximos, quando comparado os três tipos de furação. Já na dilatação os melhores resultados também foram na furação a laser por trepanação, porém os furos B2 e A5 apresentaram bons resultados.

A partir dos resultados obtidos, foi então aplicada o método de tomada de decisão *Critic Method*, seguindo o passo a passo do item 3.4 do presente trabalho.

Portanto foi obtida a matriz normalizada seguindo a etapa 2. A Tabela 5 apresenta os valores normalizados da matriz de decisão.

Tabela 5 – Matriz normalizada.

Furo	TRM (mg/min) Média	Dilatação (μ m) Média	Rugosidade (μ m) Média
A1	0,036062999	0,14503233	0,175993
A2	0,19300246	0,18458217	0,4108437
A3	0,054033905	0,19811408	0,2374601
A4	0,250096799	0,25954463	0,4702812
A5	0,055569938	0,13843837	0,2853001
A6	0,093939987	0,29925484	1
A7	0,064744112	0,17733973	0,3870687
A8	0,245773096	0,25997927	0,5914758
B1	0	0,13212332	0,2345607
B2	0,092466612	0,12401625	0,5526239
B3	0,006167392	0,23758722	0,3893882
B4	0,101328252	0,2621943	0,6717889
B5	0,013634822	0,18864267	0,4233111
B6	0,097100598	0,26048596	0,4064946
B7	0,01095108	0,2705919	0,4940562
B8	0,163665888	1	0,5534938
C1	0,742631621	0	0,0060887
C2	0,69760568	0,03987058	0,0777037
C3	0,853702461	0,00082279	0,0324732
C4	0,902590995	0,01015707	0,0930705
C5	0,812212697	0,11410787	0
C6	0,818139967	0,19776544	0,0417512
C7	0,930281228	0,15258157	0,1064077
C8	1	0,12585243	0,0078284

Fonte: Autoria própria

Todos os resultados foram obtidos utilizando a ferramenta Excel da Microsoft. Após seguir o passo a passo do item 3.4 obteve-se os pesos w_j dos critérios escolhidos, sendo o maior valor aquele que representa o critério de maior relevância e aquele com menor valor apresenta o de menor relevância para o processo.

Os valores obtidos são mostrados na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6- Pesos w_j			
	TRM (mg/min) Média	Dilatação (μ m) Média	Rugosidade (μ m) Média
w_j	0,5553456	0,17278194	0,2718725

Fonte: Autoria própria

Com base nos valores dos pesos dos critérios encontrado, identifica-se que a TRM foi o critério de maior importância, apresentando o maior peso, sendo assim, a TRM tem maior representatividade para a ordenação dos critérios para a tomada de decisão. Já a dilatação é quem apresenta a menor relevância.

Na sequência foi aplicada o método de decisão SAW para ordenação das alternativas propostas. O método SAW foi escolhido por ser um método de fácil aplicabilidade e que segundo Cheng, Chan e Huang (2003), coloca esse método como uma ferramenta compreensível dos métodos multicritérios de apoio a decisão.

Seguindo o passo a passo do item 3.5 do presente trabalho, a matriz foi normalizada conforme a etapa 3, gerando a matriz normalizada R da etapa 4. Com base no referencial teórico foi definido que a TRM é um critério onde se deseja a maximização e a dilatação e rugosidade são critérios de custo, ou seja, se deseja a minimização, para a normalização da matriz na etapa 2 e 3. A tabela abaixo apresenta os valores normalizados e ponderados da matriz de decisão.

Tabela 7- Valores normalizados e ponderados da matriz de decisão

	Critérios	TRM	Dilatação	Rugosidade
	Pesos	0,555345574	0,1727819	0,27187249
A1		0,010001	0,044258	0,047885
A2		0,026184	0,042363	0,037654
A3		0,011854	0,041715	0,045207
A4		0,032071	0,038772	0,035064
A5		0,012013	0,044574	0,043123
A6		0,015969	0,03687	0,011987
A7		0,012959	0,04271	0,038689
A8		0,031625	0,038752	0,029784
B1		0,006282	0,044876	0,045333
B2		0,015817	0,045265	0,031477
B3		0,006918	0,039824	0,038588
B4		0,016731	0,038646	0,026286
B5		0,007688	0,042169	0,03711
B6		0,016295	0,038727	0,037843
B7		0,007412	0,038243	0,034028
B8		0,023159	0,003302	0,031439
C1		0,082859	0,051206	0,055287
C2		0,078216	0,049296	0,052167
C3		0,094312	0,051166	0,054137
C4		0,099353	0,050719	0,051497
C5		0,090033	0,04574	0,055552
C6		0,090645	0,041732	0,053733
C7		0,102208	0,043896	0,050916
C8		0,109397	0,045177	0,055211

Fonte: Autoria própria

Os valores normalizados na tabela 7 foram submetidos ao método SAW de acordo com a etapa 5 do item 3.5 e posteriormente os valores obtidos são ordenados do maior para o menor, para que se possa analisar o melhor processo de furação. Os

números foram ordenados de modo que o “1” é considerado o melhor processo de furação com os parâmetros definidos e “24” o processo menos adequado para a obtenção dos microfuros.

Tabela 8- Número normalizado agregado dos três decisores e ordenação do melhor processo de furação.

Alternativas	SAW	Ordem
A1	0,02622	12
A2	0,03210	11
A3	0,02608	14
A4	0,03404	9
A5	0,02610	13
A6	0,01850	24
A7	0,02509	17
A8	0,03236	10
B1	0,02357	18
B2	0,02516	16
B3	0,02121	22
B4	0,02312	19
B5	0,02165	21
B6	0,02603	15
B7	0,01998	23
B8	0,02198	20
C1	0,06989	7
C2	0,06614	8
C3	0,07593	4
C4	0,07794	3
C5	0,07301	5
C6	0,07216	6
C7	0,07819	2
C8	0,08357	1

Fonte: Autoria própria

Constatou-se que o furo C8 com o tempo de pulso 0,45ms, velocidade tangencial de 65mm/min e energia de 1,05J, é o processo de microfuração mais adequado para a obtenção do microfuro em inconel 718. Ainda neste furo, podemos observar que obtém a melhor TRM, que existe um peso maior para a tomada de decisão e bons resultados de rugosidade e dilatação.

Em relação a aplicabilidade do método, percebe-se que uma das vantagens é a ordenação minimizando a probabilidade de se empatar os processos de furação e de poder ordenar um conjunto de alternativas sobre múltiplos critérios em conflito. E com a aplicação do *CRITIC METHOD* pode-se remover uma das desvantagens do método que são as atribuições dos respectivos pesos dos critérios.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo utilizar o método de tomada de decisão por múltiplos critérios SAW para a seleção do processo de fabricação de microfuros em inconel 718 obtidos por eletroerosão de furo rápido e a laser por trepanação.

Pode-se constatar que a furação a laser por trepanação com tempo de pulso 0,45ms, velocidade tangencial de 65mm/min e energia de 1,05J, é o processo de micro furação mais adequado para a obtenção do microfuro em inconel 718. Foi possível verificar ainda que o processo de micro furação a laser por trepanação levou vantagem, quando comparado com o processo por eletroerosão, para a produção de microfuros em pá de turbinas termoelétricas.

Com a utilização do CRITIC METHOD, pode-se obter os pesos dos critérios de forma que independe da opinião do decisor, ou seja, depende apenas da variabilidade dos dados do modelo de decisão analisado. Onde o método mostrou que a TRM é o critério de maior relevância, seguido pela rugosidade e a dilatação para o processo de micro furação analisados.

Os resultados alcançados no presente trabalho enriquecem a área de conhecimento da engenharia com a aplicação de um método multicritério para a resolução de um problema ainda não tratado que evidencia um novo grupo acadêmico a ser explorado.

Encoraja-se então estudos mais aprofundados através da obtenção de mais amostras, possibilitando assim, uma análise em microfuros com maior variação nos parâmetros empregados na obtenção dos microfuros e implementação de outros critérios como os preços do processo de furação, entre outros. Além de fazer a aplicação de outros métodos de tomada de decisão para o ranqueamento das alternativas.

REFERÊNCIAS

- AFSHARI, A.; MOJAHED, M.; YUSUFF, R. M. Simple additive weighting approach to personnel selection problem. **International Journal of Innovation, Management and Technology**, v. 1, n. 5, p. 511, 2010.
- ALMEIDA, A. T. **O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritério de Apoio a Decisão**. 2. ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2011.
- ALVES, M.L. **Efeito da Medição de Rugosidade na Massa de Padrões de Massa Classe F2**. Dissertação de Mestrado, Pós-graduação em Metrologia para a Qualidade Industrial do Centro Técnico Científico da PUC-Rio., Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ: 2002.
- ARULDOSS, M.; LAKSHMI, M. T.; VENKATESAN, V. P. A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. **American Journal of Information Systems**, v. 1, N. 1, 31-43, 2013.
- AY, M.; ÇAYDAŞ, U.; HASÇALIK, A. Optimization of micro-EDM drilling of inconel 718 superalloy. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, Elazig, p. 1015-1023. 10 jun. 2012.
- BISCAIA, Ricardo V. B. **Caracterização da microfuração de inconel 718 realizada pelos processos de eletroerosão por penetração de furo rápido e pela furação a laser por trepanação**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.
- BRALLA, J. G. **Handbook of product design for manufacturing: a practical guide to low-cost production**. 2. ed. New York, McGraw- Hill, 1988.
- BROWN, M. S.; ARNOLD, C. B. Fundamentals of Laser-Material Interaction and Application to Multiscale Surface Modification. **Laser Precision Microfabrication**, Princeton, v. 135, p.91-120, jun. 2010.
- CALÓ, Edilson Henriques. **Estudo comparativo da eficiência entre os processos de corte plasma e laser no material ASTM A36 na espessura de 12mm**. 2013. 42 p. TCC (pós graduação em engenharia de soldagem) – Centro universitário do instituto mauá de tecnologia, São caetanos do sul, 2013.

CHAKRABORTY S, Yeh CH. A simulation based comparative study of normalization procedures in multiattribute decision making. In: Conf on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases, 2007. P. 102-9.

CHENG S., CHAN C. W., HUANG G.H. **An integrated multi-criteria decision analysis and inexact mixed integer linear programming approach for solid waste management.** Engineering Applications of Artificial Intelligence, 16 (2003), p 546–554.

CHENG S., CHAN C. W., HUANG G.H., **An integrated multi-criteria decision analysis and inexact mixed integer linear programming approach for solid waste management.** Engineering Applications of Artificial Intelligence, 16 (2003), p 543–554.

CHOU, S.; CHANG, Y.; SHEN, C. **A Fuzzy Simple Additive Weighting System under Group Decision-Making for Facility Location Selection with Objective/Subjective Attributes.** European Journal of Operational Research, n. 189, p. 132-145, 2008.

CHURCHMAN C.W, & ACKOFF R.L, **An approximate measure of value, Journal of Operations Research Society of America**, Vol. 2, No. 1, pp. 172-187. 1954.

Cruz, C., 1989, **Análise da usinagem do aço-villares: VC-131 para matrizes com diferentes tratamentos térmicos no processo de usinagem por eletroerosão**, X COBEM, 1989.

DIAKOULAKI, D., MAVROTAS, G. and PAPAYANNAKIS, L. (1995) **Determining Objective Weights in Multiple Criteria Problems: The CRITIC Method.** Computers & Operations Research, 22, 763-770, 1995.

Engenheiro de materiais. Disponível em: <http://engenheirodemateriais.com.br/2017/02/08/rugosidade-de-uma-superficie/>. Acessado em: 08 de out. 2018

FORNAROLI, C.; HOLTKAMP, J.; GILLNER, A. Laser-beam helical drilling of high quality micro holes. **Physics Procedia**, Aachen, v.41, p.661-669, mar. 2013.

GOMES, L.F.A.M.; GOMES, C.F.S. & ALMEIDA, A.T. **Tomada de Decisão Gerencial: Enfoque Multicritério.** Editora Atlas, Rio de Janeiro, 2002.

HAJKOWICZ S., HIGGINS A., **A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management.** European Journal of Operational Research, article in press (2006).

JAHAN, A., MUSTAPHA, F., SAPUAN, S.M. et al. **Int J Adv Manuf Technol** (2012) 58: 411.

JAHAN, A., Kevin L. Edwards. et al. **A state-of-the-art survey on the influence of normalization techniques in ranking: improving the materials selection process in engineering design** (2015) 335-342.

JOSSO, Bruno; BURTON, David R.; LALOR, Michael J. **Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation**. *Wear*, v. 252, n. 5, p. 491-500, 2002.

JOURNAL OF CHEMICAL AND PHARMACEUTICAL RESEARCH. Coden, 06 jun. 2014.

JUNIOR, Dair Ferreira Salgado. **Influência dos parâmetros de usinagem na qualidade da microfuração com laser pulsado nd:yag em chapas de aço inoxidável aisi 316l**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Materiais e processo de fabricação. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2016.

JUNIOR, Luiz Fernando Nunes. **Tomada de decisão com múltiplos critérios: Pesquisa-ação sobre o método ahp em pequena Empresas**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Economia, Contabilidade e Administração. Universidade de Taubaté. Taubaté, 2006.

KABASSI K., VIRVOU M., **Personalised adult e-training on computer use based on multiple attribute decision making**. *Interacting with Computers*.16 (2004), p 115-132.

KLOCKE, F. et al. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes. **Cirp Annals-Manufacturing Technology**. Aachen, p. 703-726. maio 2014

KUPPAN, P.; RAJADURAI, A.; NARAYANAN, S. Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, London, p. 74-84. 31 maio 2008.

LEE, H.T. and TAI, T.Y., “**Relationship between EDM parameters and surface crack formation**”, *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, 2003.

MARINS, Fernando Augusto Silva et al. **Métodos de tomada de decisão com múltiplos critérios**: aplicações na indústria aeroespacial. 1º . ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. 248 p. v. único.

MASIERO FILHO, I. **APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO POR LASER NA CONFEÇÃO DE DISPOSITIVOS MÉDICOS ENDOLUMINAIS**. 2002. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

Moldes Injeção Plásticos. Disponível em: <<http://moldesinjecao plasticos.com.br/eletroerosao-tecnologia-de-usinagem-por-descargas-eletricas-edm/>>. Acessado em 05 de out. de 2018.

NAEEM, Mohammed; WAKEHAM, Mike. **Laser Percussion Drilling of Coated and Uncoated Aerospace Materials with a High Beam Quality and High Peak Power Lamp Pumped Pulsed Nd:Yag Laser**, 2010.

OLINIKI, Ricardo, **Influência da combinação entre os parâmetros de usinagem por eletroerosão na integridade superficial do aço AISI H13 temperado e revenido**, 2009, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 127p.

PODVEZKO, Valentinas. The Comparative Analysis of MCDA Methods SAW and COPRAS. **Inzinerine Ekonomika-engineering Economics**, Lithuania, v. 2, n. 22, p. 134-146, abr. 2011.

REZENDE, Helio Fernando Fernandes de. **SELEÇÃO DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES GERENCIAIS DE PROJETOS UTILIZANDO SAW e VIP ANALYSIS**. 2012. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Administração, Faculdade de Economia e Finanças Ibmec, Rio de Janeiro, 2012.

SCHMIDT, Igor; SABO, Sarita C.. **Usinagem por eletroerosão**. Porto Alegre, Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatronica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Pontifícia universidade Católica do Estado do Rio Grande do Sul, 2008.

SILVA, Anderson Martins da. **ANÁLISE DO PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA**. 2011. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Detec – Departamento de Tecnologia, Unijuí - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2011.

SILVA, Arlindo et al. **Desenho Técnico moderno**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2004. 461 p.

SILVA, Edilson Raimundo. **ABORDAGEM MULTICRITERIAL DIFUSA COMO APOIO AO PROCESSO DECISÓRIO PARA A IDENTIFICAÇÃO DE UM REGIME DE VAZÕES ECOLÓGICAS NO BAIXO CURSO DO RIO SÃO FRANCISCO**. 2010. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia Escola PolitÉcnica, Salvador, 2010.

STUCHI, Gabriel Augusto Domingos. **Geração Termelétrica: Principais componentes e tipos de centrais termelétricas**. 2015. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

SUCHATAWAT, M. **MATHEMATICAL MODELLING OF MULTIPLE PULSED LASER PERCUSSION DRILLING**. 2011. 162 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doctor Of Philosophy (phd) In The Faculty Of Engineering And Physical Sciences, University Of Manchester, Manchester, 2011.

VELASQUEZ, M.; HESTER, P. An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. **International Journal of Operations Research**, v. 10, n. 2, p. 56–66, 2013.

ZANAKIS, S. H. et al., **Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods**. *European Journal of Operational Research*, 107 (1998), p 507-97.