



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

NAYARA JORGE VIEIRA

**APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NA DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE EM
PEÇAS USINADAS POR TORNEAMENTO**

FORTALEZA

2018

NAYARA JORGE VIEIRA

**APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NA DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE EM
PEÇAS USINADAS POR TORNEAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V716a Vieira, Nayara Jorge.
Aplicação da Lógica Fuzzy na Determinação da Rugosidade em Peças Usinadas por Torneamento / Nayara Jorge Vieira. – 2018.
43 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima.

1. Lógica Fuzzy. 2. Rugosidade. 3. Usinagem. I. Título.

CDD 620.1

NAYARA JORGE VIEIRA

**APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NA DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE EM
PEÇAS USINADAS POR TORNEAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luiz Soares Junior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe, Maria Eunice (*in
memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À minha mãe (*in memoriam*), que em vida me deu muito apoio, incentivo para os estudos e correr atrás dos meus objetivos.

Ao meu pai, Evandro, e minha irmã, Lorrana, pelo apoio e amor durante toda minha vida.

Ao Lemuel, por caminhar ao meu lado me dando toda a força e coragem necessárias nos últimos meses.

Aos meus amigos, que foram indispensáveis nessa caminhada, mas em especial ao Raimundo Arrais, Matheus Henrique e Francisco Renan, que em 2018 tornaram essa última jornada muito menos pesada com o companheirismo nos momentos de descontração e nas horas incansáveis de estudo.

Ao Prof. Dr. Lima, pela orientação desse trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues e Prof. Dr. Luiz Soares Junior pelo tempo disponibilizado pela leitura e participação da banca desse trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica e da Coordenação, Hélio e Fernando, pela disponibilidade e suporte.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes.”
(Marthin Luther King)

RESUMO

O acabamento superficial é um fator de grande importância em produtos usinados, pois garante a qualidade da peça após passar por um processo de usinagem como torneamento. O seu indicador é a rugosidade. Determinar a rugosidade superficial de uma peça antes de um processo de torneamento por meio de definições ideais dos parâmetros do processo de usinagem pode contribuir com a qualidade do produto, além de otimizar o tempo e gastos. Para a realização desse tipo de reconhecimento, a lógica fuzzy pode ser eficaz devido a utilização de informações imprecisas e não lineares presentes no processo de torneamento. Com auxílio da ferramenta Matlab R2015a, os parâmetros de corte são utilizados como entrada no Fuzzy Logical Toolbox. As conclusões mostram que as saídas obtidas de rugosidade foram satisfatórias em relação aos valores teóricos, validando o conjunto de regras aplicadas para modelagem. Mas sugerem que a metodologia de projeto seja configurada de modo a analisar uma maior quantidade de variáveis e avaliação mais ampla de amostragem.

Palavras-chave: Lógica Fuzzy. Usinagem. Rugosidade da peça.

ABSTRACT

The surface roughness is a factor of great importance in machined products, guarantees the quality of the part after going through a machining process like turning. It is indicated by roughness. Determining the surface roughness of a part prior to a turning process by means of optimum machining process parameter settings can contribute to product quality as well as optimize time and expense. For this type of recognition, fuzzy logic can be effective due to the use of imprecise and non-linear information present in the turning process. With the help of the Matlab R2015a tool, the cutting parameters are used as input to the Fuzzy Logical Toolbox. The conclusions show that the roughness outputs were satisfactory in relation to the theoretical values, validating the set of rules applied for modeling. But it suggests that the design methodology be configured so as to analyze a greater amount of variables and wider sampling assessment.

Keywords: Fuzzy Logic. Machining. Surface Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Remoção de material	16
Figura 2	– Parâmetros de corte em torneamento	17
Figura 3	– Desvios de superfície e combinação da rugosidade da superfície	18
Figura 4	– Rugosidade média em perfil de superfície	19
Figura 5	– Ilustração geométrica de avanço f e raio r na rugosidade	20
Figura 6	– Variação da Rugosidade com velocidade de corte.....	21
Figura 7	– Etapas da Lógica Fuzzy	22
Figura 8	– Exemplo de conjuntos velocidade	22
Figura 9	– Função triangular	23
Figura 10	– Função trapezoidal	24
Figura 11	– Função gaussiana	24
Figura 12	– Complemento, intersecção e união dos conjuntos fuzzy	25
Figura 13	– Rugosidade Teórica ($R_{m\acute{a}x}$)	28
Figura 14	– Interface inicial do Fuzzy Logic Designer no Matlab	29
Figura 15	– Dados da variável de entrada avanço	30
Figura 16	– Dados da variável de entrada raio de ponta	30
Figura 17	– Dados da variável de entrada velocidade de corte	31
Figura 18	– Dados da variável de saída rugosidade máxima	32
Figura 19	– Visualização das entradas e defuzzificação no Fuzzy Logic	36
Figura 20	– Comparação valores de $R_{m\acute{a}x}$ com dados do ensaio 1.....	37
Figura 21	– Comparação valores de $R_{m\acute{a}x}$ com dados do ensaio 2.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rugosidade Teórica, $R_{\text{máx}}$	31
Tabela 2 – Base de regras implementadas no Fuzzy Logic	33
Tabela 3 – Dados da rugosidade medida ensaio 1.....	34
Tabela 4 – Dados da rugosidade medida ensaio 2	35
Tabela 5 – Resultados de $R_{\text{máx}}$ da modelagem com dados ensaio 1	37
Tabela 6 – Resultados de $R_{\text{máx}}$ da modelagem com dados ensaio 2.....	38

LISTA DE SÍMBOLOS

f	Avanço
r	Raio de ponta de ferramenta
$R_{\text{máx}}$	Rugosidade máxima teórica
$R_{\text{máxFUZZY}}$	Rugosidade máxima fuzzy
$R_{\text{máx1}}$	Rugosidade máxima do ensaio 1
$R_{\text{máx2}}$	Rugosidade máxima do ensaio 2
V_c	Velocidade de corte
a_p	Profundidade de corte
D_m	Diâmetro da peça
n	Número de rotações por minuto
π	Constante da circunferência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Usinagem e Torneamento	16
2.2	Acabamento Superficial	17
2.2.1	<i>Rugosidade</i>	18
2.3	Lógica <i>Fuzzy</i> ou <i>Nebulosa</i>	21
2.3.1	<i>Introdução a Lógica Fuzzy</i>	21
2.3.2	<i>Conjuntos Fuzzy</i>	24
2.3.3	<i>Regras Fuzzy</i>	26
2.3.4	<i>Inferência Fuzzy</i>	26
2.3.5	<i>Aplicação em Engenharia</i>	27
3	METODOLOGIA	27
3.1	Definição de Dados para Rugosidade	27
3.2	Aplicação de Dados em Fuzzy	28
3.3	Aplicação de Dados Reais no Modelo Fuzzy	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Influência dos parâmetros de entrada na base de regras	35
4.2	Análise dos Resultados de R_{\max}	36
4	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

O metal é utilizado desde o início dos tempos pelo homem para o desenvolvimento de ferramentas que atendam a sua necessidade. Atualmente, os mais diversos tipos de materiais passam pelo processo de usinagem e, com o desenvolvimento tecnológico, há uma constante busca por métodos que busquem a otimização dos processos de manufatura.

Na indústria metal mecânica, é de grande importância que as peças produzidas atendam a condições mínimas de qualidade. A qualidade superficial de uma peça usinada deve ser garantida pelo processo, tendo em vista ser um dos requisitos mais importantes quando um cliente busca um produto usinado. Além de determinar a qualidade, essa característica pode interferir no comportamento funcional de uma peça, um fator técnico de grande importância.

Mas para garantir que esse critério seja alcançado é necessária a determinação dos parâmetros ideais de processo. Admitir os valores desses parâmetros para a garantia de uma rugosidade superficial desejada de uma peça usinada é um dos principais problemas decorrentes de quem trabalha com processos de manufatura. Benardos e Vosniakos (2003) afirmam que há grande dificuldade na determinação de valores de parâmetros do processo para obter qualidade do produto e maximizar o desempenho do sistema de fabricação com os recursos disponíveis. Logo, a capacidade de prever a rugosidade da peça é de grande interesse na área de fabricação.

O uso de inteligência artificial tem crescido para soluções de problemas em engenharia. Alguns trabalhos vêm sendo realizados a partir de métodos não binários como a lógica fuzzy para problemas voltados ao controle de qualidade superficial e outros problemas de engenharia em que o domínio do conhecimento é comumente impreciso. Algumas aplicações podem ser relatadas, tais como aplicação de controle fuzzy em sistemas de qualidade superficial e dimensional (CAPELI et al., 2009), controle da queima no processo de retificação (ALI et al., 2004); controle de altura do arco em processo de soldagem (BIGAND et al., 1994), entre outros.

A utilização de um sistema inteligente para determinação da rugosidade de materiais usinados vem sendo desenvolvida e apresenta um desafio para pesquisadores. Com isso, este trabalho propõe um desenvolvimento de modelo

fuzzy para definição da rugosidade de materiais em aço no processo de torneamento.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é construção do modelo fuzzy para determinação de valores da rugosidade.

1.2 Objetivo Específico

A construção de um modelo fuzzy para determinação da rugosidade de peças usinadas com dados obtidos da literatura para peças em aço e ferramenta de metal duro, utilizando parâmetros de avanço, raio de ponta de ferramenta e velocidade de corte.

Em seguida, a implementação de valores de testes realizados no processo de torneamento e a comparação dos valores de rugosidade máxima reais com os valores da modelagem para validar o uso da modelagem pela lógica fuzzy com os parâmetros pré-determinados no estudo da área de fabricação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Usinagem e Torneamento

O processo de usinagem segundo Ferraresi (1970) é definido como operações que conferem forma, dimensões ou acabamento a uma peça, ou a combinações destes três itens e produzem cavaco. Sendo o cavaco a porção removida de material da peça pela ferramenta. A Figura 1 ilustra o processo de retirada de material no conceito de usinagem.

Os processos de usinagem podem ser divididos em convencional e não convencional, sendo os mais tradicionais: torneamento, fresamento, furação e retificação.

Figura 1 – Remoção de material



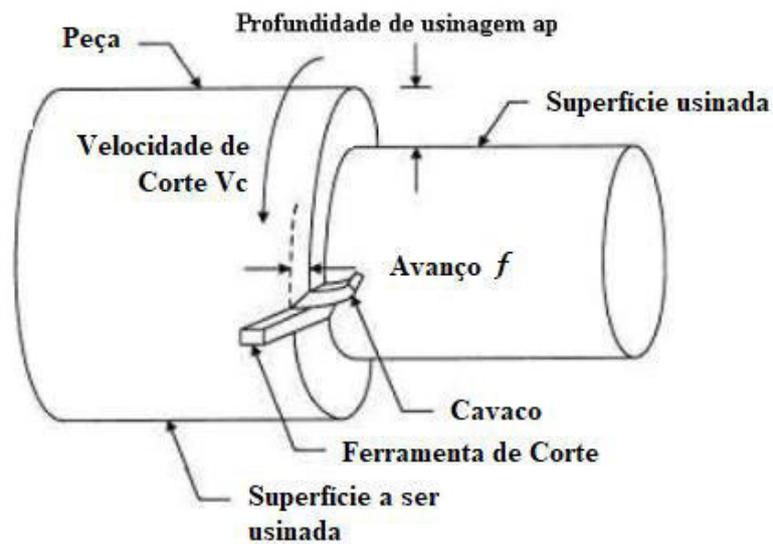
Fonte: Adaptado de Trent (2000).

Sendo um dos processos mecânicos de usinagem mais difundidos e a operação mais empregada entre os trabalhos de corte em metal, segundo Trent (2000), o torneamento é caracterizado pelos movimentos de corte e avanço, além dos seus parâmetros de corte como avanço, velocidade e profundidade de corte, de acordo com Pontes (2006). Ferraresi (1970) afirma que esse processo mecânico de usinagem é utilizado para se obter superfícies de revolução, onde a ferramenta se movimenta conjuntamente com a peça que é fixada ao eixo da máquina em movimento de rotação, representada na Figura 2.

A forma de deslocamento da ferramenta pode classificar o torneamento em retilíneo ou curvilíneo, além da classificação quanto à finalidade como torneamento de desbaste, operação anterior ao acabamento onde a peça já se

encontra próxima a forma e dimensão final, e torneamento de acabamento em que se obtêm as dimensões finais da peça.

Figura 2 – Parâmetros de corte em torneamento



Fonte: Adaptado de Amorim (2002).

No torneamento, os parâmetros de corte e a geometria da aresta de corte exercem influência que determina o resultado final do processo, independentes do tipo de material da ferramenta de corte e da peça usinada de acordo com Amorim (2002).

Entre as grandezas de corte (Figura 2), o avanço é a distância em que a ferramenta percorre por revolução ou curso da peça, profundidade de corte é a largura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho e velocidade de corte é a velocidade em que a superfície não cortada passa pela aresta cortante, seguindo a direção e sentido de corte.

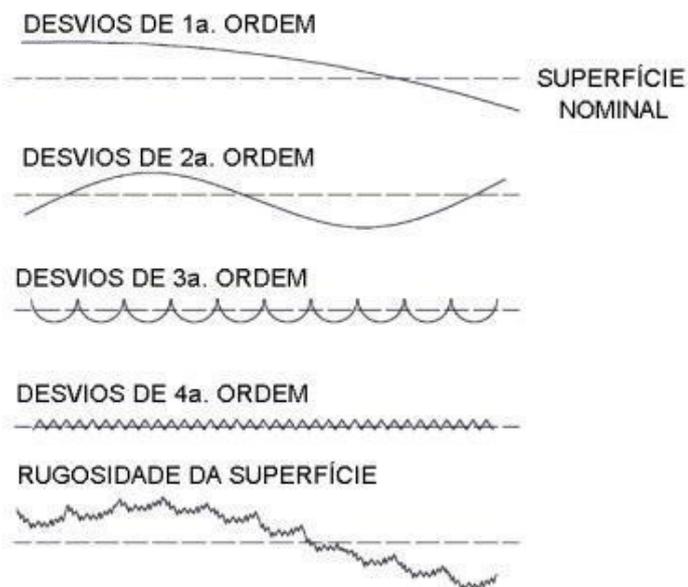
2.2 Acabamento Superficial

O acabamento superficial é uma medida que indica a qualidade da superfície da peça, sendo seu estudo de grande importância quando se deseja obter peças com alta precisão de ajuste, onde a precisão dimensional, de posição e de forma não garantem o acoplamento adequado das peças.

2.2.1 Rugosidade

Após passar por um processo de acabamento numa máquina-ferramenta ou por um processo de fabricação, pode ser observado na superfície da peça a presença de micro irregularidades geométricas. Essas irregularidades podem ser classificadas como desvios da superfície em relação a superfície nominal (ideal) de terceira até sexta ordem, conforme a Figura 3, e se sobrepõem formando o perfil de rugosidade da superfície (BENARDOS E VOSNIAKOS, 2002).

Figura 3 – Desvios de superfície e combinação da rugosidade da superfície

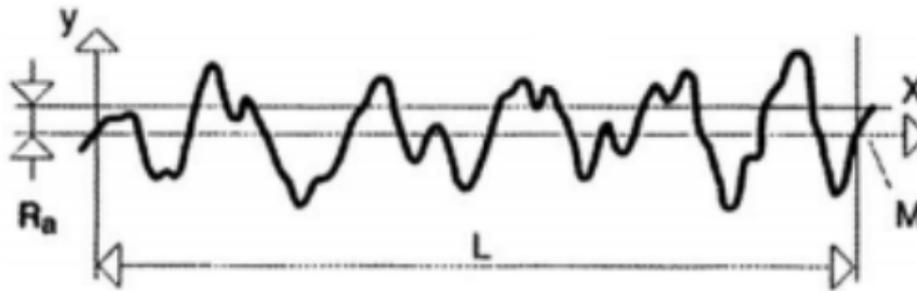


Fonte: Adaptado DIN 4760 (1982).

A rugosidade superficial é avaliada a partir da altura e largura das irregularidades e é caracterizada pelo tipo de medição em que esses dados são obtidos. O método de medição mais comum é o da linha média, ou sistema M, onde as grandezas são obtidas a partir da linha de referência, linha média, sendo esta paralela à direção do perfil, dentro da faixa de medição.

O parâmetro utilizado para R_a , que segundo a Norma ISO 4287 (2002), é utilizada internacionalmente para determinação da rugosidade. Sendo R_a a área entre o perfil de rugosidade e sua linha central, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Rugosidade média em perfil de superfície



Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2010).

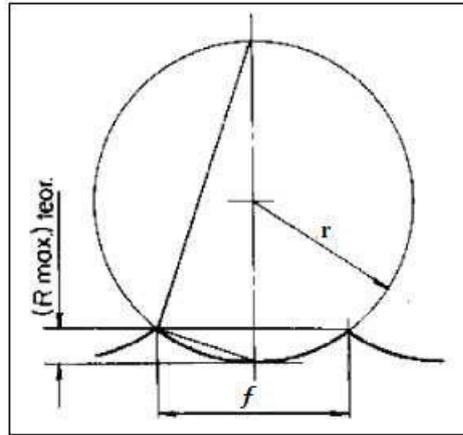
A rugosidade possui uma formação que depende de muitos parâmetros do processo de usinagem, incluindo: a geometria da ferramenta de corte, geometria da peça, materiais submetidos ao processo de corte, condições de corte, rigidez da máquina ferramenta, dentre outros. Segundo Benardos e Vosniakos (2002), os parâmetros que influenciam na qualidade da superficial são conhecidos e os principais que atuam diretamente na rugosidade média da peça usinada são: profundidade de corte, avanço, velocidade de corte, desgaste da ferramenta, uso de fluidos de corte e as componentes da força de corte.

Ferraresi (1970), no entanto, afirma que o raio de ponta da ferramenta é um dos principais fatores que influem sobre a rugosidade superficial de uma peça quando avaliado junto ao avanço. As considerações geradas a partir da relação entre esses dois parâmetros pode determinar um acabamento superficial ideal na peça. Para o processo de torneamento, essa relação é obtida pela Equação 1 abaixo (FERRARESI, 1970).

$$(R_{\text{máx}})_{\text{teórico}} \approx f^2 / 8 * r \quad \text{para } r > f \quad (1)$$

em que $R_{\text{máx}}$ é o valor teórico da altura de rugosidade máxima, em μm , f é o avanço, em mm/rot , e r é o raio de curvatura da ponta de ferramenta, em mm . Na prática, o valor de $R_{\text{máx}}$ normalmente é maior que o teórico devido a fatores como vibração e fluxo lateral do cavaco (DINIZ et al., 2005). A relação representada pela Equação 1 é demonstrada geometricamente pela Figura 5.

Figura 5 – Ilustração geométrica do avanço e raio de ponta de ferramenta na rugosidade

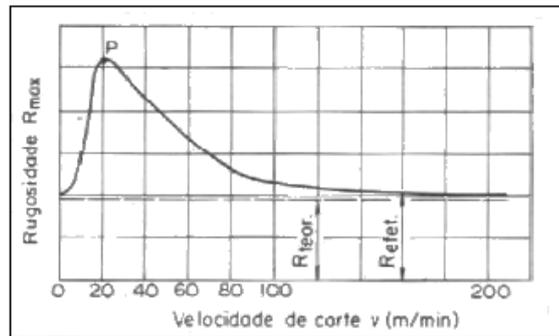


Fonte: Adaptado de Ferraresi (1970).

A equação de rugosidade máxima teórica tenta prever um menor valor possível para rugosidade em um processo de torneamento, considerando somente o benefício do aumento do raio de ponta da ferramenta. Porém, deve ser observado que o aumento do raio a partir de um ponto crítico pode afetar de forma negativa a rugosidade, pois promove o crescimento das forças de usinagem e vibrações (AMORIM, 2002).

Ferraresi (1970) explica a influência da velocidade de corte sobre o acabamento superficial devido a formação da aresta postiça de corte. Em processos de torneamento que requisitam velocidades baixas, partículas depositadas na superfície de saída se aderem ao cavaco e à superfície usinada prejudicando o acabamento superficial da peça. O ideal, segundo Ferraresi (1970), é que a velocidade de corte seja no mínimo 100m/min (Figura 6), pois a partir desse valor a rugosidade atinge um estágio de melhor qualidade e tornando-se estável.

Figura 6 – Variação da Rugosidade com velocidade de corte



Fonte: Adaptado de Ferraresi (1970).

A velocidade de corte, quando não fornecida por tabelas que compatibilizam o tipo de operação com o material da ferramenta e material usinado, pode ser obtida a partir da Equação 2 abaixo.

$$V_c = (\pi * D_m * n) / 1000 \quad (2)$$

em que V_c é o valor da velocidade de corte, em m/min, D_m é o diâmetro da peça, em mm, n é o número de rotações por minuto da peça ou ferramenta, em rpm, e π é a constante da circunferência (3,1416).

Se uma operação de usinagem for controlada sob condições de corte mantidas constantes, para cada operação específica, a superfície usinada pode ter uma variação relativamente pequena quanto a rugosidade. Sendo assim, o acabamento superficial pode ser considerado o mesmo para toda a área da peça. Isso permite um melhoramento dos processos de usinagem com o objetivo de se estabelecer uma rugosidade específica com base nos parâmetros selecionados para sua determinação (KALPAKJIAN e SCHMID, 2010).

2.3 Lógica Fuzzy

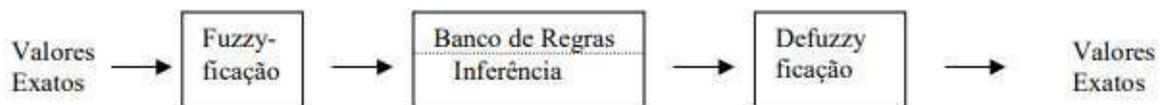
2.3.1 Introdução à Lógica Fuzzy

A Teoria Fuzzy, também conhecida como lógica nebulosa, foi apresentada inicialmente por Lotfi A. Zadeh (1965) ao sugerir que elementos podem pertencer mais a um conjunto do que outros, se diferenciando da lógica Booleana em que seus

valores são admitidos como verdadeiro ou falso e apresentam uma fronteira bem definida.

O termo fuzzy representa o termo “difuso”, e propõe a caracterização mais ampla dos sistemas que estão sendo analisados. Considerando que problemas cotidianos apresentam informações que são aproximadas ou imprecisas, a tomada de decisão realizada pela mente humana é de característica nebulosa e pode ser expressa em termos linguísticos. A lógica fuzzy traduz essas informações imprecisas em termos matemáticos a partir de um tratamento de classes dos elementos e suas relações num determinado universo. As etapas de processo da lógica ocorrem de acordo com o esquema da Figura 7.

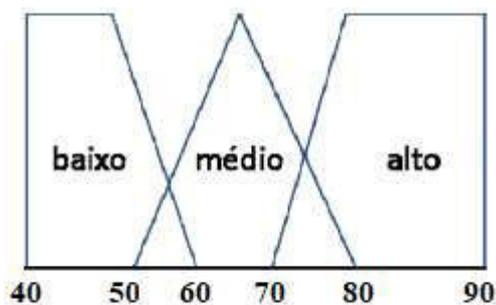
Figura 7 – Etapas da Lógica Fuzzy



Fonte: Bauchspiess, 2008

Dentro dessa teoria, o conceito de pertinência é utilizado para admitir aos elementos valores num intervalo de $[0 \text{ e } 1]$, onde 0 indica nenhuma pertinência e 1 indica total pertinência. Na Figura 8 é representado um exemplo da teoria fuzzy para velocidades em conjuntos classificados como: baixo, médio e alto. Percebe-se que para velocidade de 53, o elemento pertence a duas classes, baixo e médio, porém o grau de verdade ou pertinência é diferente, fazendo com que a sentença possa ser parcialmente verdadeira e parcialmente falsa para o mesmo elemento dentro das duas classes.

Figura 8 – Exemplo de conjuntos velocidade



Fonte: Elaborada pela autora.

As funções de pertinência podem apresentar diferentes formas ou representações gráficas. As mais importantes são: triangular, trapezoidal e gaussiana.

As funções triangulares, na Figura 9, representada pela Equação 3, possuem três variáveis (a , b , c), onde a e c determinam um intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e b é o ponto onde a função é máxima. Na figura, o eixo vertical indica os valores da função de pertinência, e no horizontal os valores da variável que está sendo estudada. A função triangular é dada pela Equação 3.

$$\text{trimf}(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (3)$$

Figura 9 – Função triangular

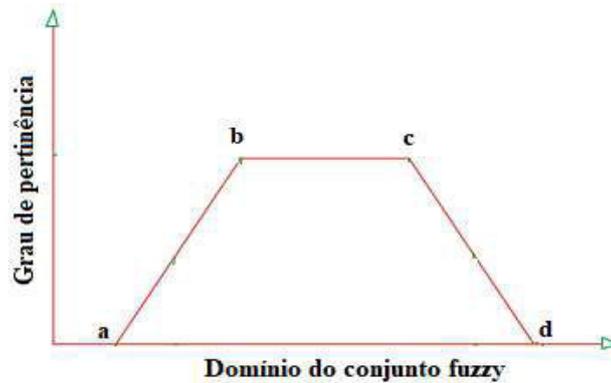


Fonte: Elaborada pela autora.

As funções trapezoidais, na Figura 10, apresentam um conjunto com quatro valores de a , b , c e d , onde a e d determinam o intervalo dentro da função de pertinência para valores diferentes de zero, e b e c determinam o intervalo dentro do qual a função máxima é igual a um. A representação dos eixos é a mesma da função anterior. A função é dada pela Equação 4.

$$\text{trapmf}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (4)$$

Figura 10 – Função trapezoidal



Fonte: Elaborada pela autora

As funções gaussianas, na Figura 11, são caracterizadas pela média (c) e o seu desvio padrão (σ). Esta função possui um leve decaimento e apresenta, valores diferentes de zero em todo o domínio da variável estudada. Com o eixo vertical indicando os valores da função de pertinência e o horizontal os valores da variável que se deseja estudar. A função gaussiana é dada pela Equação 5.

$$gaussmf(x; \sigma, c) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (5)$$

Figura 11 – Função gaussiana



Fonte: Elaborado pela autora

2.3.2 Conjuntos Fuzzy

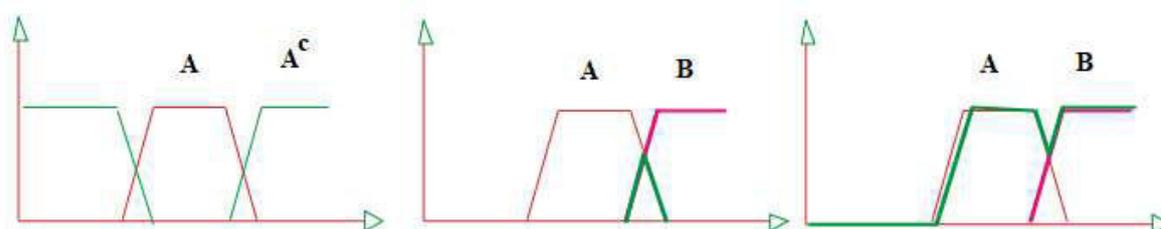
Como visto anteriormente, os conjuntos fuzzy classificam os elementos de um dado universo de forma menos rígida, diferente dos elementos utilizados na teoria clássica, pois admitem graus pertinência.

Para realizar a escolha de função de pertinência, o problema precisa ser analisado e modelado para processar o que se deseja. As funções podem ser lineares ou não lineares, dependendo do grau de complexidade do problema. Para a escolha dessa função, é necessário levar em consideração o contexto em que as funções serão utilizadas para representar as variáveis linguísticas e o conhecimento do processo que será analisado (AMENDOLA, 2005).

As variáveis linguísticas são formas de representar uma variável ou conceito de um problema. Considerando a sentença “o limite de velocidade é baixo”, a variável *limite* recebe o valor *baixo*, que é um conjunto fuzzy definido para esta variável. A partir dessa definição, os modificadores indicam a intensidade dos valores fuzzy e podem ser aumentadores ou diminuidores da área de pertinência de um conjunto, a modificação pode ocorrer quando é utilizado termos como: *muito*, *pouco*, *quase*, *extremamente*, entre outros (MARRO et al., 2010).

Para realizar a operação entre elementos distintos de vários conjuntos fuzzy são utilizadas funções matemáticas entre os conjuntos. As operações mais utilizadas dentro dessa teoria é de união representada por \cup , intersecção por \cap complemento por \neg . A Figura 12 mostra a representação gráfica de cada operação para dois conjuntos fuzzy A e B tal que $x \in U$.

Figura 12 – Complemento, intersecção e união dos conjuntos fuzzy



Fonte: Elaborada pela autora.

Essas operações definem a função de pertinência dos valores que estão relacionados a dois ou mais conjuntos. No entanto, são funções que já são implementadas no programa.

2.3.3 Regras Fuzzy

A forma de expressar o conhecimento é por meio de regras de condição e ação. Em fuzzy são aplicadas para operação dos conjuntos e, assim, obter resultantes. Criadas a partir de um raciocínio coerente, deve-se seguir primeiro a avaliação do antecedente a regra e aplicar na resultante o resultado. Um exemplo dessa consideração pode ser: se x é baixo, então o x é seguro. Isso significa que uma entrada x possui grau de pertinência tal que o valor de pertinência para um z é um conjunto *seguro*.

Quando o problema possui várias entradas, o grau de pertinência de cada uma deve ser definido. Podem ser utilizados conectivos *e* e *ou*, onde o operador *e* é utilizado em operações de união e *ou* é utilizado para intersecções. O raciocínio em casos com várias resultantes possui um mesmo grau de pertinência para todas as saídas.

2.3.4 Inferência Fuzzy

A inferência fuzzy é o processo onde ocorre a definição e avaliação das regras. Essa etapa é realizada através de um tipo de controlador, onde os principais são Sugeno e Mamdani. Onde Sugeno é o grupo que para inferência não utiliza definições em funções de implicação e operadores, e Mamdani realiza definição da saída fuzzy a partir de funções em operadores de composição, segundo Andrade e Jacques (2008).

O controlador utilizado neste trabalho é o Mamdani, e o desenvolvimento para definição da saída será realizado a partir de quatro passos: a fuzzyficação, avaliação das regras fuzzy, agregação das regras fuzzy e defuzzyficação (MARRO et al., 2010).

Em fuzzyficação, cada entrada possui um grau de pertinência para cada conjunto. O universo é delimitado de acordo com o conhecimento do especialista. Em seguida, a avaliação das regras é realizada utilizando operados *e* e *ou*, obtendo-se o valor antecedente e correlacionando com um valor consequente. As regras são agregadas a um só conjunto no terceiro passo, produzindo uma saída para o caso estudado.

Essa saída precisa passar pelo processo de desfuzzyficação, processo que não é precisamente o inverso da fuzzificação. Mas realiza a conversão dos valores fuzzy em saída numérica. A técnica do centróide mais comum, obtém o ponto onde uma linha vertical divide ao meio um conjunto agregado, variando sua precisão de acordo com o tamanho do intervalo escolhido (MARRO et al., 2010).

2.3.5 Aplicação em Engenharia

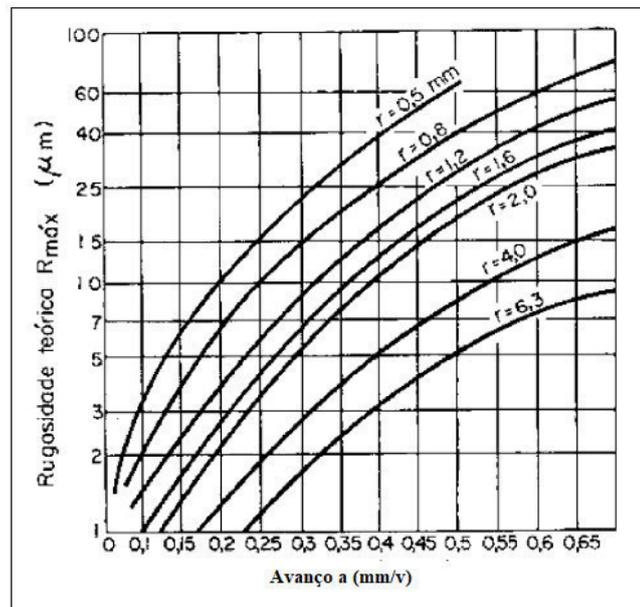
A lógica fuzzy pode ser aplicada sempre que for necessário prever, controlar ou manipular dados que possuam uma relação de maior complexidade. No ambiente de engenharia, diariamente sistemas de lógica e simulação precisam ser utilizados para validação de conceitos, teorias ou experimentos. Por ser uma ferramenta inteligente, a lógica fuzzy pode ser adaptada a diversos estudos da área, já aplicada em análise sensorial, previsão de dados, posicionamento de manipulador robótico (CAVALCANTI, 2012), mostrando sua versatilidade e importância para os estudos em engenharia.

3 METODOLOGIA

Para atingir o objetivo deste trabalho foi realizada a implementação de dados com base na literatura no software Matlab R2015a para, então, serem comparados com dados realizados por testes. A medida de rugosidade utilizada para avaliação do estudo foi a rugosidade máxima ($R_{m\acute{a}x}$).

3.1 Definição de Dados para Rugosidade

Os dados utilizados para programação da lógica foram obtidos a partir da rugosidade máxima determinada pela razão do quadrado do avanço sobre oito vezes o raio de ponta da ferramenta (FERRARESI, 1970). Foram admitidos intervalos dos valores de raio e avanço dentro de uma faixa de valores teóricos de rugosidade máxima ($R_{m\acute{a}x}$). A Figura 13 ilustra a relação dos parâmetros utilizados como a base de dados deste trabalho.

Figura 13 – Rugosidade Teórica ($R_{m\acute{a}x}$)

Fonte: Adaptada de Ferraresi (1970).

A velocidade de corte, também é utilizada na determinação da rugosidade, pois é um parâmetro que precisa ser determinado no ensaio de torneamento, além de ser um dos principais fatores de influência na rugosidade superficial da peça. Para a determinação do intervalo de trabalho, também foi utilizada a teoria com base no Ferraresi (1970).

Para cada parâmetro foram definidos os seguintes intervalos:

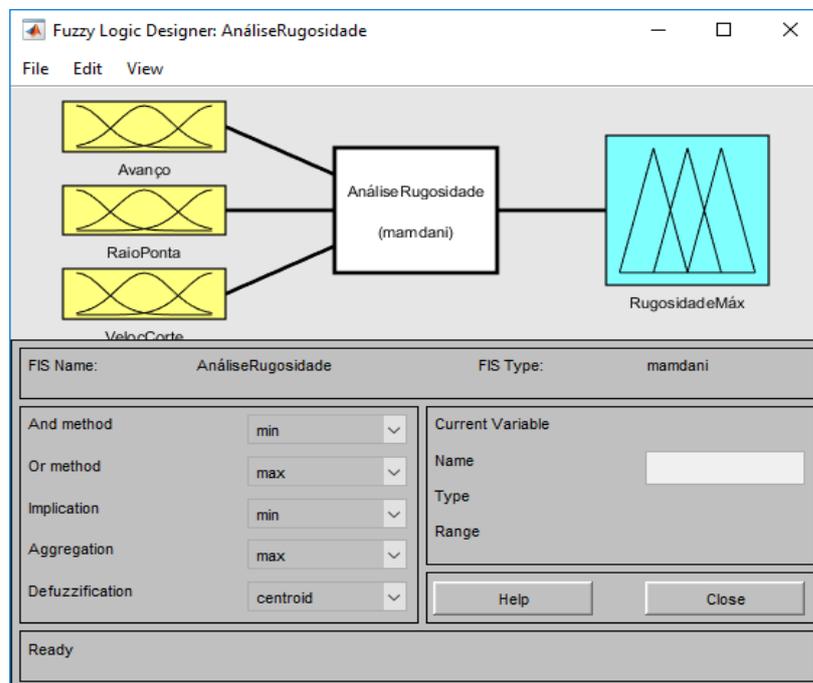
- Avanço: 0 a 0.65 mm/rot;
- Raio de ponta da ferramenta: 0 a 2.5 mm;
- Velocidade de corte: 0 a 200 m/min.

3.2 Aplicação de Dados em Fuzzy

Definidos os valores dos parâmetros estudados, estes foram levados para o ambiente Fuzzy Logical Toolbox, um toolbox do software de análise Matlab R2015a, que disponibiliza funções e arquivos necessários para o uso da teoria de conjuntos fuzzy. E como é desejado que as entradas correspondam a uma saída baseado num conjunto de regras, o sistema escolhido foi de Mamdani.

A metodologia utilizada para construção da função de interesse foi iniciada com a determinação dos parâmetros avanço, raio de ponta de ferramenta e velocidade de corte como variáveis de entrada e a rugosidade máxima como variável de saída. Os valores inseridos para fuzzificação são associados a função de pertinência triangular, escolhida por implementar as operações necessárias para o tipo de problema a ser verificado. A Figura 14 mostra a interface inicial com as primeiras definições.

Figura 14 – Interface inicial do Fuzzy Logic Designer

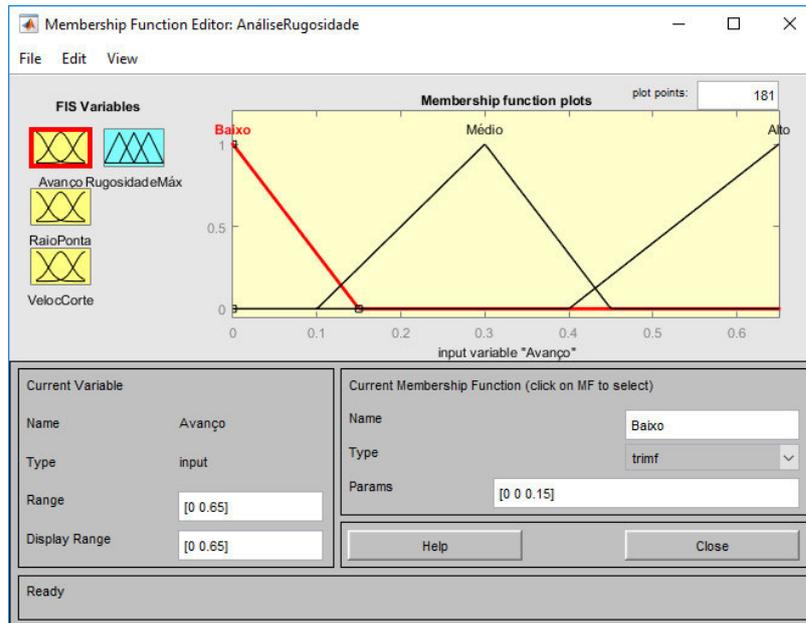


Fonte: Elaborada pela autora.

Para cada entrada são atribuídos termos linguísticos associados a um conjunto com função de pertinência variando de 0 a 1. As variáveis do sistema foram divididas em três conjuntos utilizando os termos como: *baixo*, *médio* e *alto*.

Sendo uma função triangular, a entrada avanço foi dividida como o conjunto *baixo* parametrizado em $[0 \ 0 \ 0.15]$, *médio* em $[0.1 \ 0.13 \ 0.45]$, e *alto* em $[0.4 \ 0.65 \ 0.65]$. O intervalo dos dados é mostrado na Figura 15 como range, que no avanço é de $[0 \ 0.65]$.

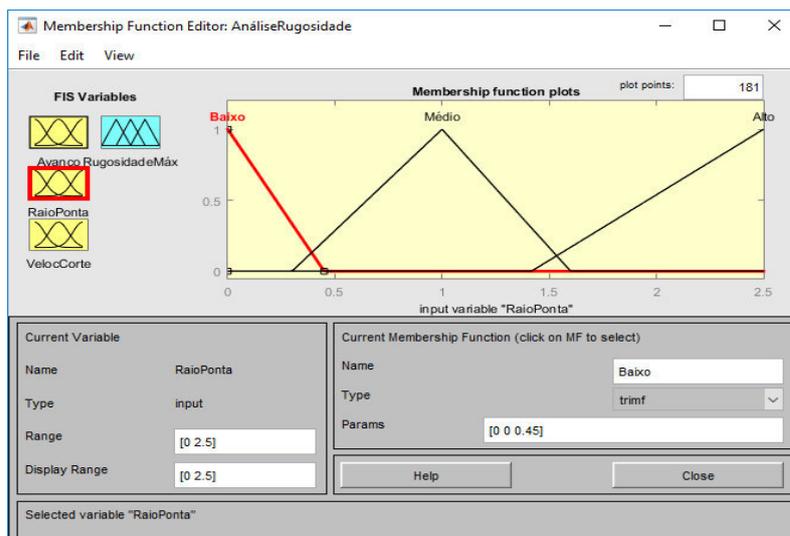
Figura 15 – Dados da variável de entrada avanço



Fonte: Elaborada pela autora.

O raio de ponta, com o range de [0 2.5], foi parametrizado no conjunto *baixo* em [0 0 0.45], *médio* em [0.3 1 1.6] e *alto* em [1.4 2.5 2.5]. A representação dos conjuntos é ilustrada na Figura 16 abaixo.

Figura 16 - Dados da variável de entrada raio de ponta

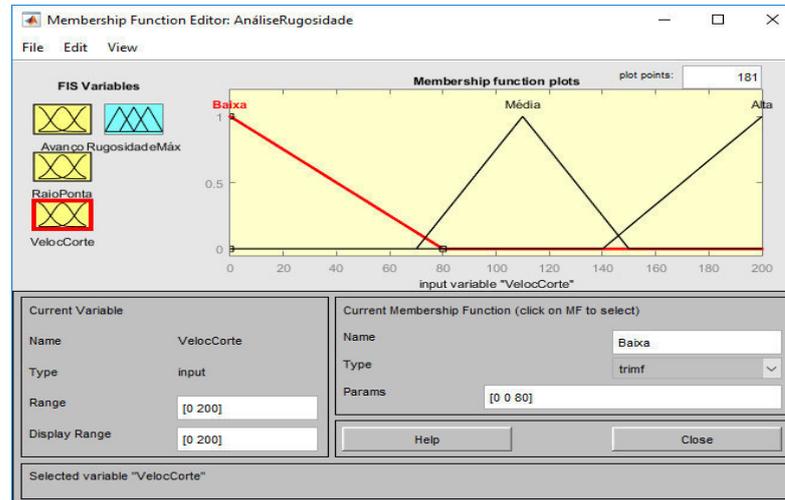


Fonte: Elaborada pela autora.

A última variável de entrada, a velocidade de corte, de range [0 200], recebeu a parametrização do conjunto *baixo* em [0 0 80], *médio* em [70 110 150] e

alto em [140 200 200]. A representação dos conjuntos da velocidade é mostrada na Figura 17.

Figura 17 - Dados da variável de entrada velocidade de corte



Fonte: Elaborada pela autora.

Para os intervalos das entradas foram calculados os valores teóricos da rugosidade máxima $R_{m\acute{a}x}$ apresentados na Tabela 1.

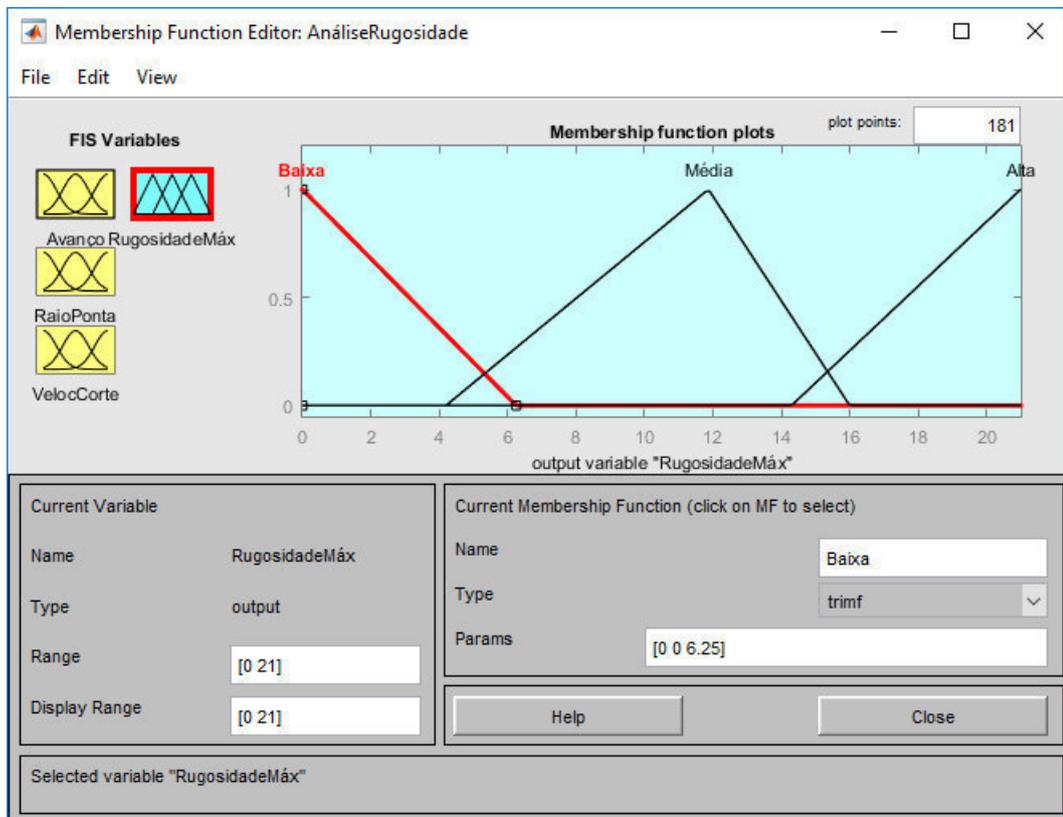
Tabela 1 – Rugosidade Teórica, $R_{m\acute{a}x}$

Conjuntos	Avanço (mm/rot)	Raio de ponta (mm)	$R_{m\acute{a}x}$ (μm)
Baixo	0,15	0,45	6,25
Médio	0,1	0,3	4,17
	0,3	1	11,25
Alto	0,45	1,6	15,82
	0,4	1,4	14,29
	0,65	2,5	21,13

Fonte: Elaborada pela autora.

Com isso, a rugosidade máxima foi definida com um range de [0 21] e parametrizados para conjunto *baixo* em [0 0 6.25], *médio* em [4.2 11.8 16] e *alto* em [14.3 21 21]. A Figura 18 mostra os dados inseridos no programa.

Figura 18 – Dados da variável de saída rugosidade máxima



Fonte: Elaborada pela autora.

A segunda etapa, após conclusão dos dados e determinação dos termos linguísticos, é a de definição da base de regras do sistema. Para isso, foram analisadas as influências de cada parâmetro no torneamento de um aço com utilização de uma ferramenta de metal duro. O primeiro fator considerado no início das definições de regras foi a relação de raio sobre avanço ser igual ou próxima a 3, essa recomendação é dada por Brierley (1963) ao se utilizar a fórmula da rugosidade máxima para materiais de aço rápido ou metal duro.

A rugosidade máxima medida por um rugosímetro pode divergir dos valores teóricos devido ao comportamento dos parâmetros de corte durante o processo de torneamento. Mas o relevante para o trabalho é inferir as regras conforme as características dos parâmetros e a comparação com o ensaio de torneamento real.

Com isso, foram inseridas quatorze regras de base avaliando o resultado da rugosidade máxima com a variação de avanço e raio para velocidades de corte

baixa, média e alta. A Tabela 2 mostra de forma simplificada a aplicação das inferências com o conectivo lógico “e”.

Tabela 2 – Base de regras implementadas no Fuzzy Logic

	If	And	And	Then
Nº	Avanço	Raio de Ponta	Velocidade	Rugosidade
1	Baixo	Baixo	Baixo	Alto
2	Médio	Médio	Baixo	Alto
3	Alto	Alto	Baixo	Alto
4	Baixo	Baixo	Médio	Médio
5	Médio	Médio	Médio	Médio
6	Alto	Alto	Médio	Médio
7	Baixo	Baixo	Alto	Baixo
8	Médio	Médio	Alto	Médio
9	Alto	Alto	Alto	Médio
10	Baixo	Médio	Alto	Baixo
11	Baixo	Médio	Médio	Alto
12	Baixo	Médio	Baixo	Alto
13	Alto	Médio	Média	Alto
14	Alto	Baixo	Média	Alto

Fonte: Elaborada pela autora.

Concluídos os módulos da base de regras e inferência, a defuzzificação é realizada a fim de traduzir o conjunto da variável de saída para um valor numérico, possibilitando então a determinação do valor de rugosidade máxima. O método aplicado nesta etapa foi de centro de gravidade ou centroide.

3.3 Aplicação de Dados Reais no Modelo Fuzzy

A avaliação de dados no modelo fuzzy foi realizada a partir de dois trabalhos científicos em que foram executados ensaios de torneamento com os valores de interesse para determinação da rugosidade máxima deste trabalho.

Os primeiros dados aplicados ao modelo foram dos ensaios realizados por Colaco (2014, p.14), denominado de Ensaio 1 para uma melhor identificação neste trabalho, onde o ensaio de torneamento realizado com barra cilíndrica num aço ABNT 1020 com insertos de metal duro atende as condições estabelecidas no modelo. A Tabela 3 apresenta os dados de rugosidade obtidos por um rugosímetro a partir da medição em posição transversal com um comprimento de amostragem de 0,8mm.

Tabela 3 – Dados da rugosidade medida ensaio 1

Velocidade de corte (m/min)	Raio de ponta (mm)	Avanço (mm)	R_{máx1} (μm)
175	0,4	0,075	10,212
175	0,4	0,1	11,794
175	0,8	0,075	9,72
175	0,8	0,1	10,836
200	0,4	0,075	8,00
200	0,4	0,1	13,312
200	0,8	0,075	8,916
200	0,8	0,1	6,123

Fonte: Adaptado de Colaco (2014).

Em seguida, foram aplicados os dados do ensaio de Stadlober (2013), denominado de Ensaio 2, realizados com os mesmos materiais de Colaco, com peça em aço e insertos de metal duro. A rugosidade foi medida a partir de três valores de raio de ponta e onze de avanço, mas foram selecionados para implementação no modelo criado de três valores de avanço e três valores de raios de ponta conforme apresenta a Tabela 4. No ensaio de Stadlober a velocidade de corte de foi mantida em 130m/min.

Tabela 4 – Dados da rugosidade medida pelo ensaio 2

Raio de ponta (mm)	Avanço (mm)	R _{máx2} (μm)
0,4	0,121	23,5
0,4	0,234	43,7
0,4	0,5	68,1
0,8	0,121	12,8
0,8	0,234	15,4
0,8	0,5	47,3
1,2	0,121	20,6
1,2	0,234	15,25
1,2	0,5	32,2

Fonte: Adaptado de Stadlober (2013).

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados de rugosidade simulados no modelo fuzzy referente aos parâmetros utilizados, além da análise da base de regras criadas para avaliação e definição da rugosidade.

4.1 Influência dos parâmetros de entrada na base de regras

Para o número de variáveis de entrada, poderiam ser criadas 27 regras para aplicação no estudo. Porém, a geração da base de regras leva em consideração o conhecimento experimental, o comportamento de cada parâmetro e as interações do avanço, raio de ponta e velocidade de corte para a resultante rugosidade prevista.

A velocidade de corte foi relacionada nas regras utilizando avanço e raio de ponta com a razão r / f ideal para obtenção de uma boa rugosidade, sendo esse valor menor que maior de 5 e menor que 10 (FERRARESI, 1970). Para valores menores que 5 ou com raio de curvatura próximo ao avanço, a superfície da peça pode apresentar aparência de rosca. Essa associação é devido a vibração que com o aumento da velocidade, tende a deixar a rugosidade maior. O aumento de velocidade de corte, para a relação r / f ideal, torna a superfície com níveis de

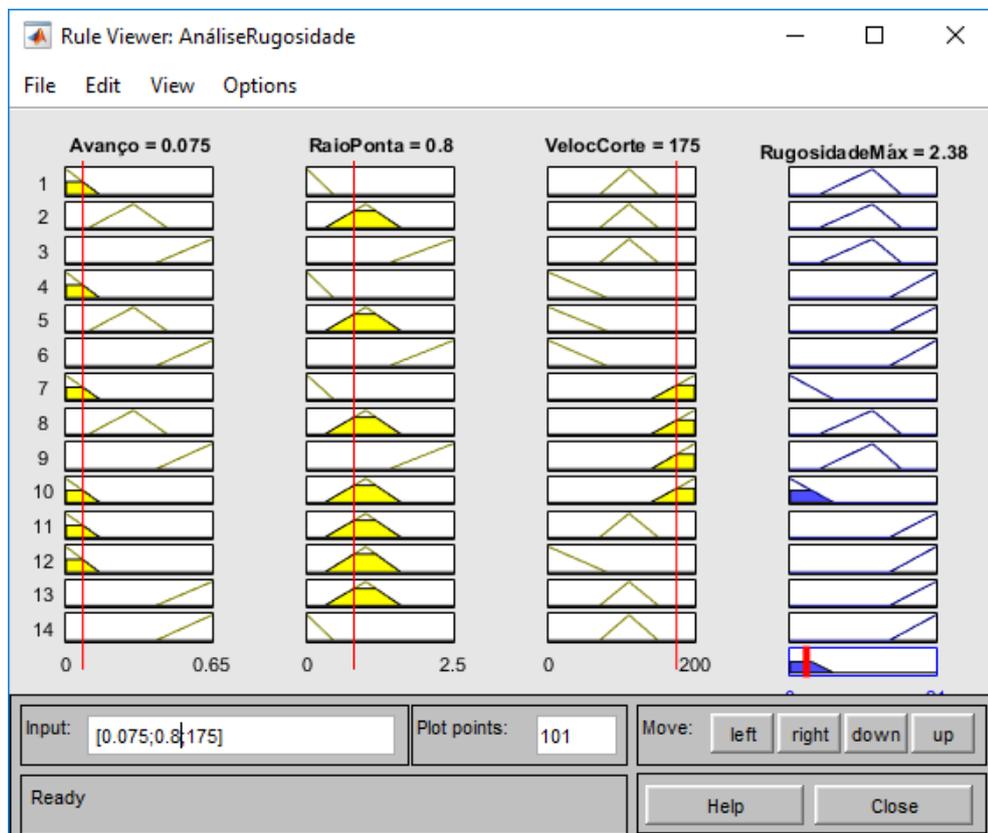
rugosidade mais baixo. No entanto, ao atingir um valor elevado, a velocidade não exerce mais tanta influência sobre o parâmetro de saída.

Com o aumento do avanço a rugosidade tende a aumentar, para os valores de raio e velocidade constante. O motivo de tal comportamento é justificado pelo valor da razão de raio e avanço sair do intervalo ideal para rugosidade. Assim, conforme a Equação 1 aplicada ao estudo, o raio de ponta quando aumentado, para valores de avanço e velocidade constante, deve diminuir o valor da rugosidade máxima medida e deve ter condição de $r > f$.

4.2 Análise dos Resultados de $R_{m\acute{a}x}$

Os valores das entradas são inseridos como input na janela de visualização das regras e, então, são identificadas dentro de cada conjunto pertencente as variáveis a sua posição e tendência na modelagem. Cada valor inserido é apresentado na janela como mostra a Figura 19, onde ocorre a defuzzificação para encontrar o valor de rugosidade $R_{m\acute{a}xFUZZY}$ previsto.

Figura 19 – Visualização das entradas e defuzzificação no Fuzzy Logic



Fonte: Elaborada pela autora.

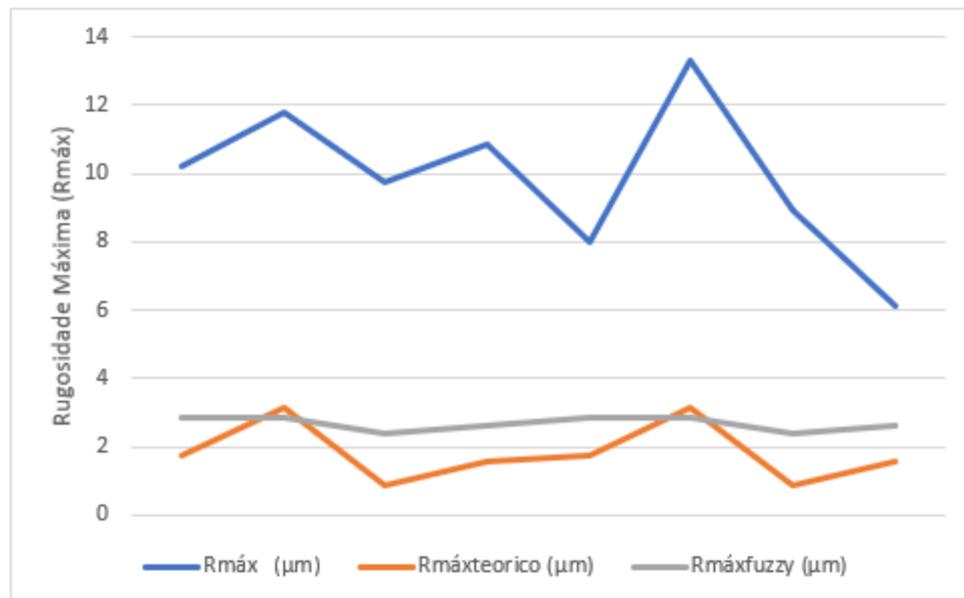
Para os dados do ensaio 1, foram calculadas a rugosidade máxima teórica $R_{m\acute{a}x}$ da Equação que relaciona avanço e raio, ou seja, sem a influência da velocidade, e $R_{m\acute{a}xFUZZY}$ para os resultados obtidos pela modelagem. Na Tabela 5, a seguir, são apresentados os resultados.

Tabela 5 – Resultados de $R_{m\acute{a}x}$ da modelagem com dados do ensaio 1

Nº	Velocidade de corte (m/min)	Raio de ponta (mm)	Avanço (mm)	$R_{m\acute{a}x1}$ (μm)	$R_{m\acute{a}x}$ (μm)	$R_{m\acute{a}xFUZZY}$ (μm)
1	175	0,4	0,075	10,212	1,76	2,85
2	175	0,4	0,1	11,794	3,13	2,85
3	175	0,8	0,075	9,72	0,88	2,38
4	175	0,8	0,1	10,836	1,56	2,59
5	200	0,4	0,075	8	1,76	2,85
6	200	0,4	0,1	13,312	3,13	2,85
7	200	0,8	0,075	8,916	0,88	2,38
8	200	0,8	0,1	6,123	1,56	2,59

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 20 – Comparação valores de $R_{m\acute{a}x}$ com dados do ensaio 1



Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados obtidos do ensaio 1 apresentam valores muito superiores aos determinados com base na literatura $R_{m\acute{a}x}$ e $R_{m\acute{a}xFUZZY}$. Esse efeito pode ser justificado por fatores presentes no ensaio, tais como vibração da ferramenta e

máquina, pressão da ferramenta contra peça devido a força aplicada, deformação do cavaco, entre outros, já que a relação em avanço e raio para os valores aplicados no ensaio estão no intervalo de rugosidade ideal.

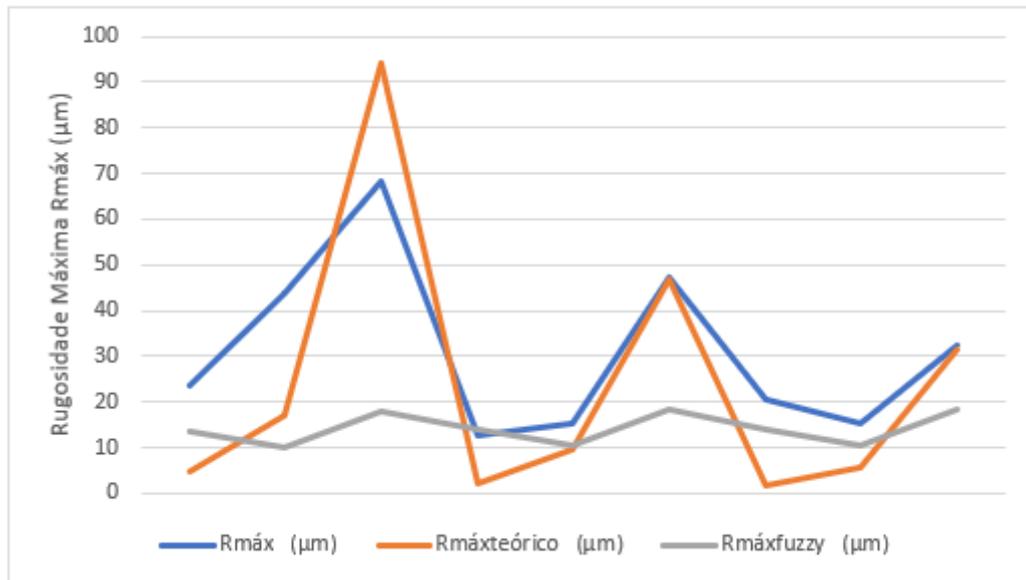
No entanto, os valores de $R_{m\acute{a}x}$ e $R_{m\acute{a}xFUZZY}$ se aproximam como mostra a Figura 20, indicando que apesar da velocidade gerar uma leve alteração na rugosidade quando inserida na relação avanço e raio, os valores resultantes podem ser levados em consideração dependendo da tolerância de aceitação para a peça ensaiada.

Para o ensaio 2, com os dados de Stadlober, foi seguida a mesma comparação de valores de $R_{m\acute{a}x2}$ do ensaio com valores teóricos calculados $R_{m\acute{a}x}$ e com o $R_{m\acute{a}xFUZZY}$ do modelo desenvolvido. Os resultados podem ser observados na Tabela 6 e Figura 21.

Tabela 6 - Resultados de $R_{m\acute{a}x}$ da modelagem com dados ensaio 2

Nº	Raio de ponta (mm)	Avanço (mm)	$R_{m\acute{a}x2}$ (μm)	$R_{m\acute{a}x}$ (μm)	$R_{m\acute{a}xFUZZY}$ (μm)
1	0,4	0,121	23,5	4,58	13,4
2	0,4	0,234	43,7	17,11	10,2
3	0,4	0,5	68,1	94,1	17,9
4	0,8	0,121	12,8	2,29	14,1
5	0,8	0,234	15,4	9,56	10,5
6	0,8	0,5	47,3	39,06	18,3
7	1,2	0,121	20,6	1,53	14,1
8	1,2	0,234	15,25	5,7	10,5
9	1,2	0,5	32,2	26,04	18,3

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 21 – Comparação valores de $R_{m\acute{a}x}$ com dados do ensaio 2

Fonte: Elaborada pela autora.

O ensaio foi realizado com velocidade de corte constante de 130m/min, e como visto na Figura 21, alguns valores de $R_{m\acute{a}x2}$ apresentam comportamento mais próximo de $R_{m\acute{a}x}$ e $R_{m\acute{a}xFUZZY}$. Com isso, é necessária a avaliação mais detalhada de cada valor encontrado da Tabela 6.

Para os valores da linha 1 da Tabela 6, a rugosidade do ensaio teve um valor bem mais elevado que o teórico e acima da rugosidade em fuzzy. Apesar da influência de velocidade, que está num valor em que favorece o acabamento superficial, alguns fatores do processo podem ter exercido uma maior influência. Já a saída de fuzzy $R_{m\acute{a}xFUZZY}$ tem uma relação r / f é de 3,3, justificando o valor de rugosidade alto, mas duvidoso em relação ao teórico $R_{m\acute{a}x}$.

Para os resultados na linha 2 da tabela, a relação de r / f é 1,7, muito próxima a 1, que justifica os valores mais altos para rugosidade. Porém o valor de fuzzy teve uma menor rugosidade entre as três, esse fator pode ser devido a presença da velocidade que influencia de forma favorável a saída, mas ainda deve ser observado.

Em 3, há a relação mais inviável, fora da condição ideal para rugosidade, o que justifica os altos valores. Mas fazendo a análise de interesse, $R_{m\acute{a}xFUZZY}$ está no conjunto que indica alta rugosidade, mas muito distante de rugosidade real.

Para linha 4, com raio de 0,8, as rugosidades apresentaram valores divergentes, o teórico indica uma rugosidade bem baixa em relação ao modelo fuzzy

e o valor real. Verificando a relação de r / f , pode-se afirmar que se encontra dentro do valor de rugosidade ideal. Logo, a saída fuzzy deve ser analisada com mais detalhe. E a real, também deve apresentar atuação de outros fatores de processo.

Avaliando N° 5 e 6, o comportamento das três rugosidades são parecidas. O que dificulta um pouco na avaliação devido a diferença dos valores verificados anteriormente.

Para os testes com raio de ponta 1,2, em 7 temos uma relação alta entre raio e avanço, próxima a 10. Apesar da relação obedecer $r > f$ é esperada uma rugosidade mais alta. Sendo positiva nos resultados de obtidos por fuzzy e real, mas mantendo uma diferença considerável entre elas.

Em 8 temos valores divergentes para os três parâmetros, onde a rugosidade teórica é baixa., rugosidade fuzzy média e real alta. A relação r / f está dentro da faixa ideal, indicando influencia da velocidade em fuzzy e de processo no resultado real.

Para os valores da linha 9 a relação de raio de ponta e avanço é de 2,4, indicando resultados fora da rugosidade ideal. Os valores obedeceram a esse ponto, em fuzzy o resultado se encontra no conjunto *alto* indicando valores de maiores rugosidades.

5 CONCLUSÃO

A utilização da lógica fuzzy, em comparação com os dados teóricos, apresentam uma proximidade e coerência. Apesar dos dados teóricos utilizados só levem em consideração o raio e avanço, muitos outros fatores estão envolvidos durante um ensaio de torneamento, o que gerou uma grande diferença nos resultados do primeiro ensaio analisado.

Ao determinar a rugosidade de uma peça que será usinada num processo de torneamento pela lógica fuzzy, a utilização dos parâmetros de avanço, raio de ponta de ferramenta e velocidade, apesar de alguns valores dentro do esperado na teoria, não são suficientes. Na base de regras pode ser levado em consideração um maior número de parâmetros como profundidade de corte, utilização de fluido de corte, força aplicada na usinagem, vibração entre máquina-ferramenta e o controle dessas as condições durante o processo.

Com isso, conclui-se que para aplicação da lógica fuzzy na determinação da rugosidade superficial, as regras implementadas no Fuzzy Logic devem ser aprimoradas, não sendo validada para o uso restrito dos parâmetros definidos.

REFERÊNCIAS

- ALI, Y. M. & ZHANG, L. C. **A fuzzy Model for Predicting Burns in Surface Grinding of Steel**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 44, p. 563-571, 2004.
- ANDRADE, M.; JACQUES, M. A. P.; **Estudo comparativo de controladores de Mamdani e Sugeno para controle de tráfego em interseções isoladas**. 2008.
- AMENDOLA, P. D. M.; DE SOUZA, MSC. ANDERSON LUIZ, CARVALHO, P. D. L. **Manual do uso da teoria dos conjuntos Fuzzy no MATLAB 6.5**. . 2005, p. 44.
- AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 114p. Dissertação de mestrado – UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BAUCHSPIESS, A. **Introdução aos Sistemas Inteligentes: Aplicações em Engenharia de Redes Neurais Artificiais, Lógica Fuzzy e Sistemas Neuro-Fuzzy**. Brasília, 2008.
- BENARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G. C. **Prediction of surface roughness in CNC in machining: a review**. Intenational Journal of Machine Tools & **Manufacture**, V43, p.833-844, 2003.
- BIGAND, A.; GOUREAU, P. KALEMLARIAN, J. **Fuzzy control of a welding process. Proceedings of IMACS International Symposium on Signal Processing, Robotics and Neural Networks 9SPRANN '94**, Villeneuve d'Ascq, France, April, 1994, p. 379- 342.
- BRIERLEY, R. G. & SIEKMANN, H. J. **Machining principles and cost control**. Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1964.
- CAPELI, O. M.; ALBUQUERQUE, A. R. P. L.; ISOTANI, S. **Aplicação de controle fuzzy em sistemas de qualidade superficial e dimensional**. XXVI ENEGEP, Fortaleza, 2006.
- CAVALCANTI, J.H.F.; MELO, H.; SOUTO, C.R.; CAVALCANTI, M.T. **Lógica Fuzzy Aplicada às Engenharias**. João Pessoa PB, 2012.
- COLACO, G. A.; MEDEIROS, I. D. M.; **Análise da Influência dos Parâmetros de Usinagem sobre a Rugosidade no Torneamento Cilíndrico Externo em Corte a Seco e com Abundância de Fluido de Corte**. XXXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Curitiba, 2014.
- DAWIHL, W. & DINGLINGER, E. **Handbuch der Hartmetallwerkzeuge**. Berlim, Springer Verlag, 1953.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artliber, 2005, 248p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda., 2009, 751p. 1970

ISO 3685, **Tool Life Testing with Single Turning Point**, International Organization for Standardization, 1993.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 6 ed. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1176p., 2010.

MARRO, A. A., SOUZA, A. M. C., CAVALCANTE, E. R. S., BEZERRA, G. S. & NUNES, R. O., **LógicaFuzzy: conceitos e aplicações**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

PONTES, F. J. **Predição da Vida de Ferramentas e da Rugosidade da peça por Redes Neurais RBF projetadas com uso da metodologia de Projeto de Experimentos**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2006.

SANDVIK, Coromant, **Manual Técnico de Usinagem**, Sandviken, Suécia, 2005.

STADTLOBER, A. S.; TREVISAN, E.; SILVEIRA, L. G.; DILLSCHNEIDER, L. H.; ROSA, V. B.; **Análise de Rugosidade Superficial de Superfície Torneada em Função do Avanço e do Raio de Ponta da Ferramenta**. 2013.

TRENT, E. M., WRIGHT, P. K., **Metal Cutting**. Woburn, MA: Butterworth Heinemann, 2000, 446p.