



**FACULDADE DE
ENGENHARIA**
CAMPUS BAURU



**ESTIMAÇÃO DO DIÂMETRO E RUGOSIDADE EM
UM PROCESSO DE FURAÇÃO UTILIZANDO
MULTI SENSORES E REDES NEURAIAS
ARTIFICIAIS**

CARLOS EDUARDO DORIGATTI CRUZ

BAURU – SP
Agosto / 2010



**FACULDADE DE
ENGENHARIA**
CAMPUS BAURU



ESTIMAÇÃO DO DIÂMETRO E RUGOSIDADE EM UM PROCESSO DE FURAÇÃO UTILIZANDO MULTI SENSORES E REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS

CARLOS EDUARDO DORIGATTI CRUZ

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP -
Campus de Bauru, para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

BAURU – SP
Agosto / 2010

Cruz, Carlos Eduardo Dorigatti.

Estimação do diâmetro e rugosidade em um processo de furação utilizando multi sensores e redes neurais artificiais / Carlos Eduardo Dorigatti Cruz, 2010. 132 f.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2010

1. Monitoramento do processo de furação 2. Redes neurais artificiais 3. Diâmetro do furo usinado 4. Rugosidade I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

i. DEDICATÓRIA

Aos meus pais Raimundo e Maria, aos
meus irmãos João Henrique e Ana
Carolina e a minha noiva Amanda pelo
amor e incentivo dedico

ii. AGRADECIMENTOS

Agradeço de antemão a Deus, principal responsável por todas as conquistas e realizações de minha vida, que com sua infinita bondade e sabedoria guia meu ser e me concede capacitação à resolução de minhas atividades.

Agradeço e presto minha admiração aos meus pais, Raimundo Leite Cruz e Maria Aparecida Dorigatti Cruz pelo incentivo e apoio incondicional à minha vida e a meus estudos que possibilitaram minha caminhada até aqui. Agradeço ainda pelo amor que sempre me deram, pela educação e formação, sendo eles, os principais responsáveis pela minha formação como ser humano.

Agradeço aos meus irmãos e grandes amigos, por quem tenho grande respeito e consideração, João Henrique Dorigatti Cruz e Ana Carolina Dorigatti Cruz pelo carinho, amizade e incentivo.

Agradeço a minha noiva, Amanda do Nascimento Morgado, pelo carinho, amor e compreensão nos momentos de ausência. Ao seu enorme companheirismo e amizade agradeço.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar que já me acompanha desde minha graduação, e com quem tenho grande prazer e orgulho de trabalhar, por todo ensinamento passado, apoio e amizade, agradeço.

Agradeço a todos os meus amigos pelo apoio e ajuda das mais diversas formas. Em especial, aos amigos e engenheiros, João Gabriel Contrucci e Arthur Alves Fiocchi pela grande amizade, companheirismo de longa data e participação nesta pesquisa.

Agradeço a UNESP e a todos os seus docentes, discentes e funcionários que fizeram parte de minha formação desde a graduação. Tenho grande orgulho de aqui ter estudado e de carregar o nome desta Universidade em meu diploma.

Agradeço ao Prof. Dr. Luiz Sanchez, coordenador do Latus (Laboratório de Tecnologia da Usinagem) que permitiu a utilização das máquinas e equipamentos deste laboratório, fundamentais à realização deste trabalho

Presto meus agradecimentos à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), pela aprovação do processo de Auxílio à Pesquisa, fornecendo assim a verba necessária à realização deste trabalho.

Agradeço a Embraer, por ter permitido a continuidade de meus estudos, e presto meus agradecimentos pessoais aos meus antigos chefes por terem acreditado no meu potencial e na importância deste trabalho para meu desenvolvimento pessoal e da empresa.

Agradeço a empresa OSG e a seu engenheiro de aplicações Gustavo Santos pelo fornecimento gratuito das ferramentas utilizadas neste trabalho e por todo auxílio durante o desenvolvimento, desde a concepção, dos métodos utilizados neste trabalho.

A todos os outros que participaram direta ou indiretamente deste trabalho, agradeço, e deixo os meus votos de sucesso pessoal e profissional.

iii. LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Movimentos do processo de furação. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000).	17
Figura 2. Principais variáveis de um processo de furação convencional.....	19
Figura 3. Principais ângulos de uma broca helicoidal. (BOEIRA et al., 2010).....	20
Figura 4. Formas de desgaste de uma broca. (Adaptado de SILVA; MACHADO; COSTA)	21
Figura 5. Percentual global dos materiais utilizados na fabricação de aeronaves. (adaptado de MELO; DEL'ARCO, 2007). Distribuição % global em peso a) Boeing 777; b) Airbus A380 e c) Embraer 170.....	27
Figura 6. Principais cargas envolvidas na operação de uma aeronave (REZENDE, 2007 - Adaptado).....	34
Figura 7. Estrutura do neurônio biológico (adaptado de http://www.icmc.usp.br)	41
Figura 8. Estrutura do neurônio artificial (TAFNER, 1999 - Adaptado).....	43
Figura 9. Estrutura básica de uma rede neural artificial (adaptado de HAYKIN, 2001)	45
Figura 10. Estrutura da rede <i>Feedforward</i> de única camada (adaptado de HAYKIN, 2001)	46
Figura 11. Estrutura da rede <i>Feedforward</i> de múltiplas camadas (Adaptado de HAYKIN, 2001)	46
Figura 12. Estrutura da rede associativa (Adaptado de HAYKIN, 2001).....	47
Figura 13. Diagrama esquemático da rede "Perceptron" multicamadas (Adaptado de HAYKIN, 2001)	49
Figura 14. Ilustração dos corpos de prova utilizados nos ensaios.	58
Figura 15. Código de identificação dos corpos de prova.	60
Figura 16. Broca helicoidal de metal duro da empresa OSG utilizada para realização dos ensaios	61
Figura 17. Medição do diâmetro externo das brocas utilizando projetor de perfis	62
Figura 18. Vistas e perspectiva do banco de ensaios projetado para os ensaios	64
Figura 19. Ilustração do banco de ensaios em vista explodida.....	64
Figura 20. Máquina ferramenta e dispositivos posicionados para a realização dos ensaios.	66
Figura 21. Esquema de montagem dos sensores para realização dos ensaios.....	67
Figura 22. Posição de instalação dos sensores de E.A. e acelerômetro	71
Figura 23. Interface LabVIEW do programa desenvolvido para a coleta e armazenamento de dados	73
Figura 24. Sinal de emissão acústica apresentando elevado nível de ruído e regiões de saturação.....	74
Figura 25. Característica do sinal de força em Z utilizado para determinação do ponto inicial "1" e final "6" do corte.....	76
Figura 26. Correlação entre o processo e os sinais dos sensores.....	77

Figura 27. Divisão dos sinais referente à região de usinagem de cada um dos materiais	79
Figura 28. Esquema representativo do funcionamento do aparelho utilizado na medição da rugosidade.....	81
Figura 29. Processo de medição do diâmetro máximo e mínimo dos furos.....	81
Figura 30. Medição da rugosidade e demonstração dos furos escolhidos como amostra de cada corpo de prova.....	83
Figura 31. Arquitetura da rede neural artificial utilizada na estimação do diâmetro do furo usinado	85
Figura 32. Arquitetura da rede neural artificial utilizada na estimação da rugosidade média da parede interna do furo	86
Figura 33. Média e desvio padrão dos sinais de força em Z para as diferentes condições de usinagem ensaiadas	89
Figura 34. Média e desvio padrão dos sinais de força em X para as diferentes condições de usinagem ensaiadas	90
Figura 35. Média e desvio padrão dos sinais de força em Y para as diferentes condições de usinagem ensaiadas	91
Figura 36. Média e desvio padrão dos sinais de potência para as diferentes condições de usinagem ensaiadas	93
Figura 37. Média e desvio padrão dos sinais de aceleração para as diferentes condições de usinagem ensaiadas	94
Figura 38. Média e desvio padrão dos sinais de emissão acústica para as diferentes condições de usinagem ensaiadas	95
Figura 39. Média dos valores do diâmetro dos furos para as diferentes condições de usinagem testadas	98
Figura 40. Rede neural aplicada à determinação do diâmetro mínimo na liga de titânio	99
Figura 41. Rede neural aplicada à determinação do diâmetro máximo na liga de titânio	99
Figura 42. Rede neural aplicada à determinação do diâmetro mínimo na liga de alumínio	100
Figura 43. Rede neural aplicada à determinação do diâmetro máximo na liga de alumínio.....	100
Figura 44. Distribuição de amostras em classes de erro (estimação do diâmetro) Material Ti6Al4V	102
Figura 45. Distribuição de amostras em classes de erro (estimação do diâmetro) Material 2024T3	103
Figura 46. Média e desvio padrão da rugosidade medida para as condições de usinagem testadas	105
Figura 47. Rede neural aplicada à determinação da rugosidade média aritmética na liga de titânio.....	106
Figura 48. Rede neural aplicada à determinação da rugosidade média aritmética na liga de alumínio	107
Figura 49. Distribuição de amostras em classes de erro (Estimação do Ra) Material Ti6Al4V	108

Figura 50. Distribuição de amostras em classes de erro (Estimação do Ra) Material 2024T3	109
Figura 51. Variação do diâmetro do furo (500 rpm 22,4 mm/min)	120
Figura 52. Variação do diâmetro do furo (500 rpm 90 mm/min)	121
Figura 53. Variação do diâmetro do furo (500 rpm 250 mm/min)	121
Figura 54. Variação do diâmetro do furo (1000 rpm 22,4 mm/min)	122
Figura 55. Variação do diâmetro do furo (1000 rpm 90 mm/min)	122
Figura 56. Variação do diâmetro do furo (1000 rpm 250 mm/min)	123
Figura 57. Variação do diâmetro do furo (2000 rpm 22,4 mm/min)	123
Figura 58. Variação do diâmetro do furo (2000 rpm 90 mm/min)	124
Figura 59. Variação do diâmetro do furo (2000 rpm 250 mm/min)	124
Figura 60. Variação da rugosidade - Ra (500 rpm 22,4 mm/min)	125
Figura 61. Variação da rugosidade - Ra (500 rpm 90 mm/min)	126
Figura 62. Variação da rugosidade - Ra (500 rpm 250 mm/min)	126
Figura 63. Variação da rugosidade - Ra (1000 rpm 22,4 mm/min)	127
Figura 64. Variação da rugosidade - Ra (1000 rpm 90 mm/min)	127
Figura 65. Variação da rugosidade - Ra (1000 rpm 250 mm/min)	128
Figura 66. Variação da rugosidade - Ra (2000 rpm 22,4 mm/min)	128
Figura 67. Variação da rugosidade - Ra (2000 rpm 90 mm/min)	129
Figura 68. Variação da rugosidade - Ra (2000 rpm 250 mm/min)	129
Figura 69. Cavacos gerados com a rotação de 500 rpm	130
Figura 70. Cavacos gerados com a rotação de 1000 rpm	131
Figura 71. Cavacos gerados com a rotação de 2000 rpm	132

iv. LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ligas de alumínio divididas em classes segunda a Aluminum Association (HATCH, 1984).....	29
Tabela 2 – Funções de ativação típicas utilizadas por redes neurais artificiais.....	44
Tabela 3 – Principais propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos materiais utilizados. (Fonte: www.matweb.com).....	59
Tabela 4– Identificação e diâmetro inicial das brocas escolhidas para os ensaios.....	62
Tabela 5 – Valores de ganho utilizados no módulo do sensor de força.....	69
Tabela 6 – Valores ajustados para o módulo de E.A.	70
Tabela 7 – Especificação dos canais utilizados para leitura dos sensores	72
Tabela 8 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios	74
Tabela 9 – Parâmetros da rede utilizada na estimação do diâmetro	86
Tabela 10 – Parâmetros da rede utilizada na estimação da rugosidade (Ra)	87
Tabela 11 – Resumo dos diâmetros medidos nos ensaios para ambas as ligas.....	97
Tabela 12 – Valores de erros médios apresentados pelas redes na determinação do diâmetro dos furos	101
Tabela 13 – Valores de erros médios apresentados pelas redes na determinação do diâmetro dos furos	107

v. RESUMO

A crescente competitividade do mercado, exigência por qualidade, padronização cada vez superior e necessidade de redução de desperdícios trazem cada vez mais a automação às indústrias. Por suas características, os processos automatizados podem ser melhorados com a utilização de métodos de controle e supervisão e, neste campo, a utilização de sensores e redes neurais artificiais têm cada vez mais destaque em pesquisas. No processo de furação, estudos relatam a aplicação bem sucedida destas técnicas na determinação do fim da vida de ferramentas, contudo, em muitas aplicações, apenas o controle do desgaste da broca não é suficiente para garantir a qualidade do produto. Diâmetro do furo usinado, rugosidade e a formação de rebarbas são alguns exemplos de importantes resultados do processo que não dependem exclusivamente da condição da ferramenta de corte e, neste âmbito, estudos dedicados ao controle destas variáveis são limitados, senão inexistentes. Desta forma, este estudo foi conduzido buscando gerar uma contribuição à supervisão do processo de furação com foco na estimação do diâmetro e rugosidade do furo usinado. Utilizando um sistema de multi sensores instalados em uma máquina ferramenta e corpos de prova compostos por uma liga de titânio seguida de uma liga de alumínio, registraram-se os sinais dos sensores durante o corte para variados parâmetros de usinagem. Os dados coletados serviram de entrada a uma rede neural artificial, que foi treinada com os valores de diâmetro e rugosidade medidos parte das amostras. Depois do treinamento, a rede capacitou-se a estimar os valores de diâmetro e rugosidade média a partir dos sinais coletados somados aos parâmetros de corte utilizados na concepção do furo. Os erros do processo foram então calculados da diferença entre os valores medidos e as saídas obtidas. Os resultados demonstraram alta capacidade da rede em determinar as variáveis desejadas nas diferentes condições de usinagem com erros baixos e até mesmo desprezíveis para a maior parte das aplicações industriais, mostrando assim eficiência do método proposto.

Palavras-chave: monitoramento do processo de furação, redes neurais artificiais, diâmetro do furo usinado, rugosidade.

vi. ABSTRACT

The growing market competitiveness, product quality requirements and just in time production concept is bringing every time more automation to manufacturing industries. Productivity and quality in machining process can be improved by using monitoring and controlling methods. Along the last decades, sensors and Artificial Neural Network have been successfully utilized in many drill wear monitoring systems. However, in many industrial fields, to supervise the tool wear is not enough to assure the product qualities. Roughness, burr formation and hole diameter are some examples of important process results does not exclusively depend on the tool condition and in this area of knowledge the number of studies is limited or inexistent. Thus, this work brings a contribution on drilling process monitoring where the target was to determine the hole diameter and roughness using a multi-sensor system and artificial neural network. The specimens used were composed by a titanium alloy and aluminum alloy plates. The sensors were installed in a machine tool and the process was accomplished using several drilling parameters. The acquired sensors data were used as input in an artificial neural network which was trained with the roughness and diameter measured in some samples. After trained, the system was qualified to output the expected variables from the input signals. To calculate the errors these output values were compared with the samples measured. The results showed efficiency of the system in determining the roughness and hole diameters as the obtained errors can be considered low or negligible for the majority of drilling industrial application.

Keywords: *drilling process monitoring, artificial neural network, hole diameter, roughness.*

SUMÁRIO

I. DEDICATÓRIA	1
II. AGRADECIMENTOS	2
III. LISTA DE FIGURAS.....	4
IV. LISTA DE TABELAS.....	7
V. RESUMO.....	8
VI. ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVO.....	14
3. JUSTIFICATIVA PARA A REALIZAÇÃO DESTA PESQUISA	15
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
4.1. IMPORTÂNCIA DOS PROCESSOS DE USINAGEM.....	16
4.2. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE FURAÇÃO.....	17
4.2.1. A GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE	19
4.2.2. MECANISMOS DE DESGASTE DA FERRAMENTA.....	21
4.2.3. PARÂMETROS DE CORTE E FORMAÇÃO DO CAVACO.....	23
4.2.4. MÁQUINAS FERRAMENTA E GEOMETRIA DA PEÇA USINADA	25
4.3. USINAGEM DE LIGAS UTILIZADAS NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA	26
4.3.1. LIGAS DE ALUMÍNIO	28
4.3.2. LIGAS DE TITÂNIO	31
4.3.3. FADIGA DE COMPONENTES AERONÁUTICOS.....	32
4.4. ERROS MICRO-GEOMÉTRICOS E MACRO-GEOMÉTRICOS RESULTANTES DO	
PROCESSO DE USINAGEM.....	35
4.5. SISTEMAS DE CONTROLE E MONITORAMENTO DE PROCESSOS.....	37
4.6. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	40
4.6.1. MODELO DE NEURÔNIO BIOLÓGICO.....	40
4.6.2. MODELO DE NEURÔNIO ARTIFICIAL.....	42
4.6.3. TOPOLOGIA DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	45
4.6.4. TREINAMENTO DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	47
4.6.5. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS APLICADAS NA MANUFATURA.....	55
5. MATERIAIS E MÉTODOS	57
5.1. CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	57
5.2. FERRAMENTA DE CORTE.....	60
5.3. CONFEÇÃO DO BANCO DE ENSAIOS	63
5.4. PREPARAÇÃO DA MÁQUINA FERRAMENTA.....	65
5.5. MONTAGEM, POSICIONAMENTO E AJUSTE DOS SENSORES	67
5.5.1. SENSOR DE CORRENTE ELÉTRICA TIPO EFEITO HALL	68
5.5.2. SENSOR DE FORÇA	68
5.5.3. SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	69
5.5.4. ACELERÔMETRO.....	70

5.5.5.	LIGAÇÃO DOS SENSORES À PLACA DE AQUISIÇÃO	71
5.6.	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	72
5.7.	TRATAMENTO E ANÁLISE DOS SINAIS COLETADOS.....	75
5.8.	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DOS FUROS.....	80
5.9.	MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE.....	82
5.10.	CONSTRUÇÃO DAS REDES NEURAI.....	84
5.10.1.	REDES NEURAI NA ESTIMAÇÃO DO DIÂMETRO	84
5.10.2.	REDES NEURAI NA ESTIMAÇÃO DA RUGOSIDADE MÉDIA	86
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	88
6.1.	COMPORTAMENTOS DOS SINAIS LIDOS E SUA VARIAÇÃO COM OS DIFERENTES PARÂMETROS DE CORTE	88
6.2.	COMPOTAMENTO DO DIÂMETRO DO FURO USINADO E UTILIZAÇÃO DAS REDES NEURAI ARTIFICIAIS	96
6.3.	RESULTADO DAS REDES NEURAI APLICADAS À ESTIMAÇÃO DA RUGOSIDADE DO FURO USINADO	104
7.	CONCLUSÕES	111
8.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	114
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
	ANEXO 1 – COMPORTAMENTO DIÂMETRAL DAS AMOSTRAS ENSAIADAS	120
	ANEXO 2 – COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE NAS AMOSTRAS ENSAIADAS.....	125
	ANEXO 3 – CAVACOS COLETADOS DURANTE OS ENSAIOS.....	130

1. INTRODUÇÃO

Robôs e Máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC) são cada vez mais comuns em campos industriais. Estes equipamentos reduzem o tempo de produção, melhoram a qualidade, repetibilidade e padronização dos produtos fabricados. Quando utilizados na usinagem de peças, permitem um controle preciso em parâmetros de corte e auxiliam engenheiros de manufatura a reduzir custos de fabricação e a obter os requisitos especificados no projeto de cada produto.

Contudo, apenas a utilização de robôs e máquinas CNC convencionais não é suficiente para assegurar a qualidade de operações de usinagem não assistidas. Chama-se de usinagem não assistida ou processos autônomos, as operações nas quais a máquina ferramenta é capaz de realizar sua atividade com a quase ausência de interferência humana. Nestes processos, o sistema deve ser capaz de ler e interpretar alterações ocorridas no meio, máquina ou processo, e tomar a ação de auto-correção ou de advertência ao operador (ABU-MAHFOUZ, 2003).

Dentre os processos de usinagem, a furação é um dos mais comuns e largamente utilizados em indústrias, com destaque para os ramos aeronáutico, automobilístico, médico, eletrônico, e em fabricação de moldes e estampos (PIRTINI; LAZOGLU, 2005).

Furação de precisão é um processo cujo são exigidas apertadas tolerâncias dimensionais e bom acabamento superficial. Durante as últimas décadas estes furos podiam ser obtidos apenas com a utilização de vários passes de furação e terminados com ferramentas de geometria especial denominadas de alargadores. Todavia, a incorporação de máquinas automáticas à produção e o desenvolvimentos de ferramentas de material e geometria superior permitiram a utilização do processo denominado de *one step drilling* - OSD, que tratam da furação de um único ciclo ou furação em cheio.

O desenvolvimento do processo OSD tem uma importância especial à indústria aeronáutica. A maior parte da carga dimensionante da aeronave é transferida da fuselagem

aos reforçados estruturais (perfis, longarinas e cavernas), através de prendedores, instalados em furos ao redor das juntas (LIU et al., 2006). Em um pequeno jato, de quatro a seis passageiros, são utilizados em torno de 30 a 50 mil prendedores, apenas na fuselagem externa. A maior parte destes prendedores são rebites ou pinos. A má qualidade ou perda de tolerância nestes furos causam uma sensível redução na vida em fadiga da aeronave, devido à existência de concentradores de tensão, corrosão e princípio de trincas (LIU et al., 2006).

Nestes ambientes, a ausência de um sistema robusto que garanta a qualidade em tempo real traz a necessidade da criação de etapas de controle produtivo, o que onera a produção, aumenta o tempo de ciclo das atividades e não garante cem por cento de eficiência.

O controle de um processo de usinagem requer equipamentos capazes de manter constante todas as variáveis relevantes ao processo, o que é impossível para a maior parte dos casos. Desgaste da ferramenta, e o fim da vida de rolamentos do cabeçote do motor de furação são alguns exemplos de importantes variáveis ao resultado do processo em que é impossível evitar variações. Para estes casos, sistemas capazes de ler e interpretar oscilações são requeridos.

Um sistema inteligente de controle precisa ser capaz de alterar os parâmetros de usinagem da máquina ferramenta retornando suas características à condição inicial sempre que uma perturbação é detectada, ou estimar uma possível falha antes que ela ocorra ou se repita demonstrando ao operador que o processo deve ser avaliado evitando assim que ocorram danos ao produto, ferramenta ou máquina.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar as relações intrínsecas entre os sinais de sensores provindos do corte em um processo de furação e sua relação com o diâmetro e rugosidade dos furos produzidos. A partir destas relações, buscou-se criar um sistema capaz de estimar estes resultados durante a furação de um pacote composto de uma liga de titânio (Ti6Al4V) sobre uma liga de alumínio (2024T3), utilizando como ferramenta uma broca helicoidal de metal duro. Um sistema de multi-sensores, equipado com um acelerômetro, sensor de corrente elétrica, tipo efeito Hall, sensor de emissão acústica e dinamômetro tri-dimensional foi utilizado. Esses sinais foram coletados durante o processo de furação realizado com diferentes velocidades de corte e avanço, e serviram como entrada a uma rede Neural Artificial, que após treinamento se capacitou a estimar os diâmetros partindo dos sinais de entrada.

3. JUSTIFICATIVA PARA A REALIZAÇÃO DESTA PESQUISA

A crescente demanda por sistemas autônomos de controle ou monitoramento da manufatura dentro das empresas motivou a realização deste trabalho. Ainda hoje, muito se desperdiça em linhas de produção com o descarte, retrabalho e etapas de verificação da qualidade de peças produzidas em processos de usinagem.

Este trabalho visa contribuir com esta área de conhecimento, mais especificamente com o controle de variáveis de saída de um processo de furação, em um projeto pioneiro, que busca a partir dos sinais oriundos de sensores instalados numa máquina ferramenta e utilizando redes neurais artificiais, estimar o diâmetro e a rugosidade de furos usinados.

A ferramenta proposta neste trabalho aplica-se a qualquer indústria que utilize o processo de furação em máquina CNC na confecção de seu produto, e tem especial importância às indústrias do ramo aeronáutico que se utilizam do processo de furação de precisão em larga escala para fabricação da fuselagem das aeronaves, e mais recentemente o fazem de forma automática. Nestas empresas, a falta de um sistema de controle confiável onera significativamente os custos de produção e não garante a qualidade plena de seus componentes.

Este trabalho também buscou contribuir com o desenvolvimento de métodos inteligentes aplicados ao controle e monitoramento da usinagem na manufatura, sendo assim mais um exemplo bem sucedido da aplicação de redes neurais artificiais. Isso demonstra novamente que a aplicação destes sistemas pode ser uma poderosa ferramenta utilizada para obtenção de melhorias em qualidade e redução de custos em indústrias.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa abordar os principais tópicos que dão subsídio a discussão técnica e acadêmica do trabalho, assim como fundamentam aspectos futuramente abordados na definição dos materiais e métodos aplicados à pesquisa, às discussões apresentadas e à conclusão final deste trabalho.

Esta revisão literária trata em detalhes as características do processo de furação e sua aplicação e importância às indústrias aeronáuticas, a utilização de sensores e sistemas de monitoramento e a utilização de redes neurais artificiais no controle e monitoramento de processos de usinagem.

4.1. IMPORTÂNCIA DOS PROCESSOS DE USINAGEM

De todos os componentes mecânicos fabricados mundialmente, estima-se que 15% dos custos agregados a peças são oriundos de gastos com processos de usinagem durante sua produção (GOVINDHASAMY, 2005).

De acordo com König & Klocke (2002), atualmente os três processos de usinagem mais tradicionais na confecção de componentes mecânicos são o torneamento, o fresamento e a furação, sendo que dentre eles, este último é o menos estudado. Entretanto, estima-se que nos dias atuais, a participação da furação com brocas helicoidais no total dos processos de usinagem encontra-se na faixa da 20 a 25%, demonstrando a importância deste processo frente aos demais métodos produtivos. É difícil, senão impossível imaginar qualquer componente mecânico de média e alta complexidade que não tenha ao menos um furo em sua concepção.

A competitividade mundial existente nos diversos ramos industriais requer que as empresas busquem constante redução dos custos na produção e a eliminação dos desperdícios. Quanto se trata de processos de usinagem, esta redução é buscada através do

aumento da qualidade da peça produzida, verificada através da menor incidência de retrabalho ou desgaste de peças, redução no consumo de ferramentas e aumento nas velocidades de ciclo.

Em contra partida, ao mesmo tempo em que se busca a redução dos custos, a necessidade por produtos mais precisos, mais leves, de menores tamanhos, e mais eficientes faz com que os requisitos e tolerâncias dimensionais de projeto sejam cada dia mais apertadas.

A pesquisa bibliográfica descrita a seguir objetiva a formação de uma base teórica para aplicação nos procedimentos experimentais deste estudo.

4.2. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE FURAÇÃO

A furação é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de um furo geralmente cilíndrico numa peça, com auxílio de uma ferramenta multi cortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça se desloca segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina. A Figura 1 ilustra os movimentos de corte envolvidos em um processo de furação por meio de brocas helicoidais.

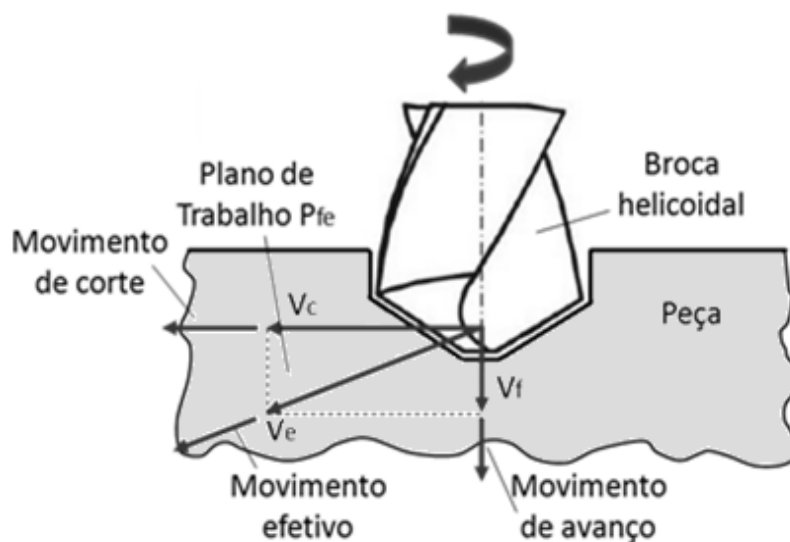


Figura 1. Movimentos do processo de furação. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2000).

Tem-se por furação, não apenas os processos realizados em furadeiras manuais ou de bancada, máquinas mais comuns ao processo, mas todo e qualquer processo que se destine a abertura de um furo respeitando o movimento retilíneo de avanço da ferramenta, mostrado na Figura 1. Assim, este processo pode ser realizado ora em máquinas onde o movimento de rotação é dado pela ferramenta, como furadeiras ou fresadoras, ora com a peça em movimento, como é o caso da utilização de tornos.

De acordo com Ferraresi (2003), o processo de furação distingue-se em furação em cheio; com presença de pré-furo; com furo escalonado ou chanfro; furação de centro; e trepanação.

Os erros geométricos e dimensionais, a presença de rebarbas e a integridade superficial definem a qualidade do processo de furação. A precisão resultante dos furos depende do tipo de processo de furação, da ferramenta, da máquina, dos parâmetros de corte, da rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça, assim como do próprio material a ser usinado. Além disso, o grau de afiação e a taxa de desgaste da broca também influenciam fortemente na precisão do furo (DROZDA; WICK, 1983).

Inúmeros fatores são capazes de afetar os resultados finais do processo de furação. A Figura 2 mostra um diagrama de Ishikawa que resume as variáveis mais relevantes de um processo convencional de furação, de acordo com a revisão literária que segue.

As variáveis mostradas na Figura 2 têm uma complexa interação entre si, e determinar a combinação ótima entre elas é geralmente uma tarefa difícil. Os tópicos que seguem visam discutir mais extensivamente estas variáveis e sua interferência sobre os resultados do processo de furação.

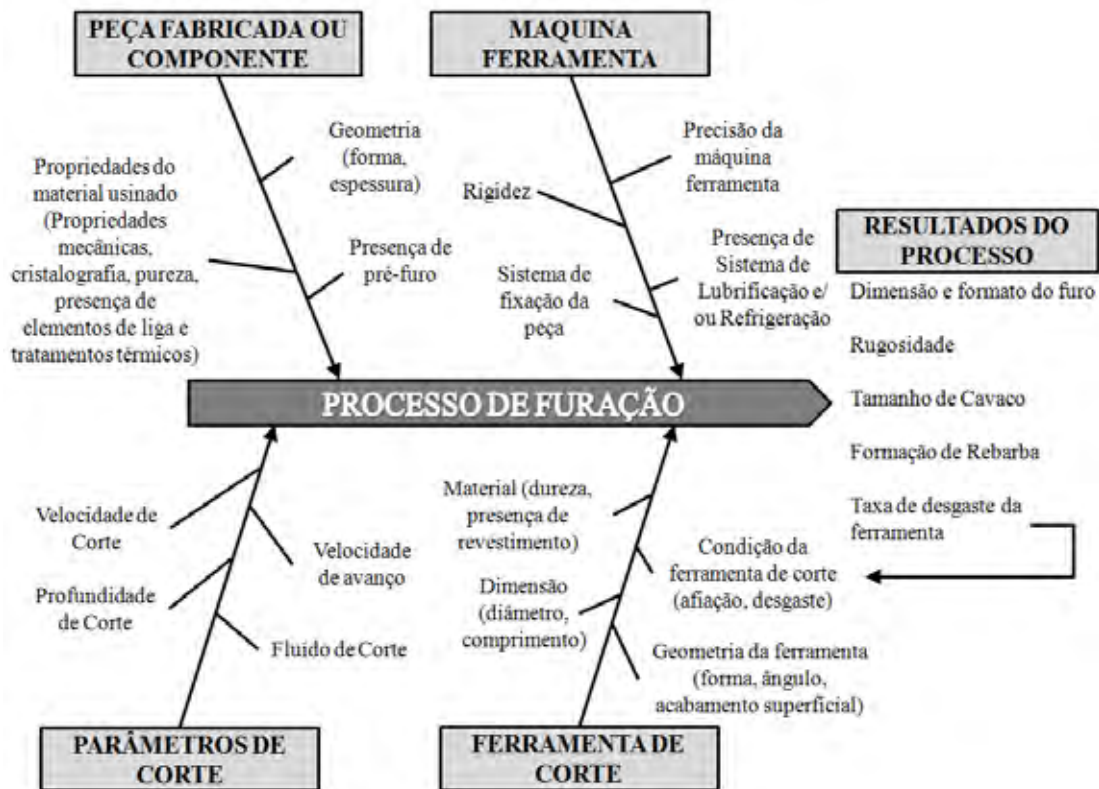


Figura 2. Principais variáveis de um processo de furação convencional.

4.2.1. A GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE

Apesar da sua aparente simplicidade, a furação é um processo complexo que sofre interferência de diversos fatores. Dentre eles, um dos mais influentes é a geometria da ferramenta de corte.

Dentre as inúmeras geometrias, ângulos e gumes presentes em uma broca destacam-se: aresta principal de corte, aresta secundária de corte, aresta transvesval, ângulo de ponta (σ), ângulo de hélice (ϕ), ângulo de incidência normal (α_n), ângulo normal de cunha (β_n) e ângulo de saída (γ_n).

Soma-se ainda a estes fatores, a rigidez da ferramenta e a dureza do material usinado, principalmente devido ao fato de que na furação as arestas cortantes trabalham imersas no interior da peça. (FERRARESI, 2003). A Figura 3 mostra os ângulos descritos em um esquema representativo de uma broca helicoidal.

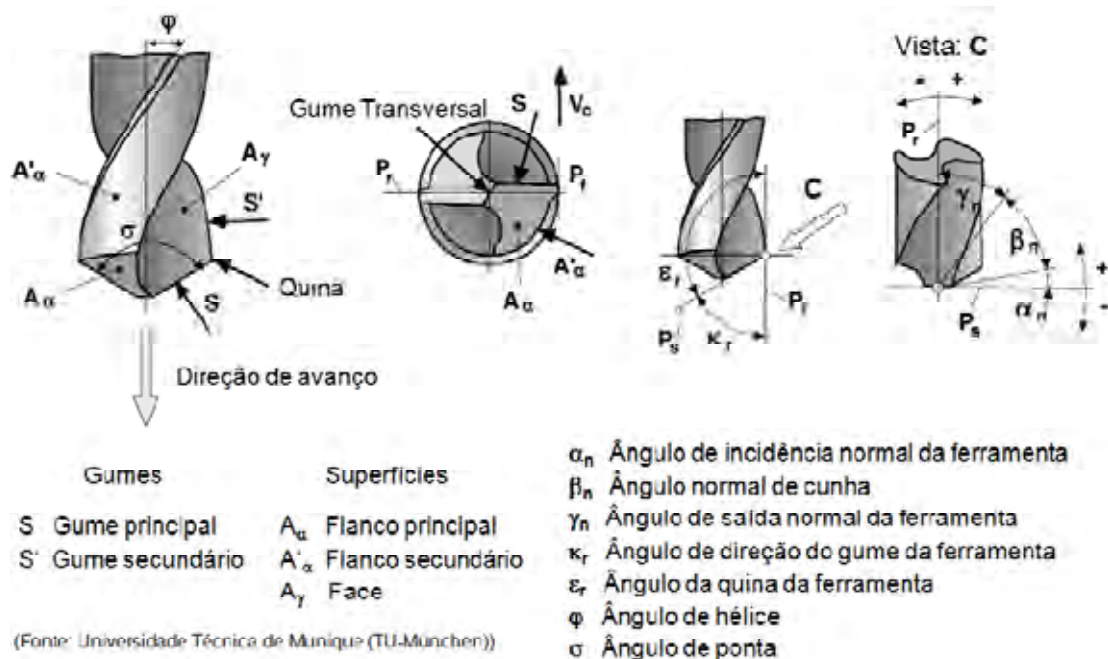


Figura 3. Principais ângulos de uma broca helicoidal. (BOEIRA et al., 2010)

A qualidade de um furo é determinada por uma síntese de erros devido à dinâmica do processo e também ao regime térmico na interferência peça/broca. Os mecanismos que induzem estes erros incluem desvios ou rotação anormal da broca na entrada, deflexões na broca devido às forças desbalanceadas, erros devidos à falha de processo, entre outros.

Além das geometrias, os materiais empregados na ferramenta de corte também têm influência no processo de usinagem. Nas últimas décadas muito se evoluiu nesta área com a introdução de brocas de aço rápido revestido, ferramentas inteiriças de metal duro, e utilização de pastilhas intercambiáveis de metal duro ou cerâmica. Apesar desta evolução, constata-se que, no Brasil, ainda há predominância na utilização de ferramentas de aço rápido devido principalmente à grande existência de máquinas antigas, que apresentam baixa rigidez construtiva e rotações insuficientes para obter os benefícios provenientes da utilização destes novos materiais.

De acordo com Kalidas, Devor e Kapoor (2001), a rigidez da broca determina, em grande parte, os erros induzidos devido aos mecanismos dinâmicos, mas não é afetado pela presença/ausência de revestimento da broca.

4.2.2. MECANISMOS DE DESGASTE DA FERRAMENTA

Não bastasse a já complexa interação entre a geometria da ferramenta e os resultados esperados no processo, ao longo da vida da ferramenta esta interação está constantemente se alterando devido à perda do fio de corte e variação geométrica provocada pelos mecanismos de desgaste.

Hutchings (1992) define o desgaste como a destruição de uma ou de ambas as superfícies que compõem um sistema tribológico da ferramenta, geralmente envolvendo perda progressiva de material.

O desgaste na broca é caracterizado principalmente por: desgaste de flanco, desgaste das arestas principal e transversal, desgaste de cratera e lascamento (PANDA et al., 2006). A Figura 4 mostra os principais tipos de desgaste mencionados.

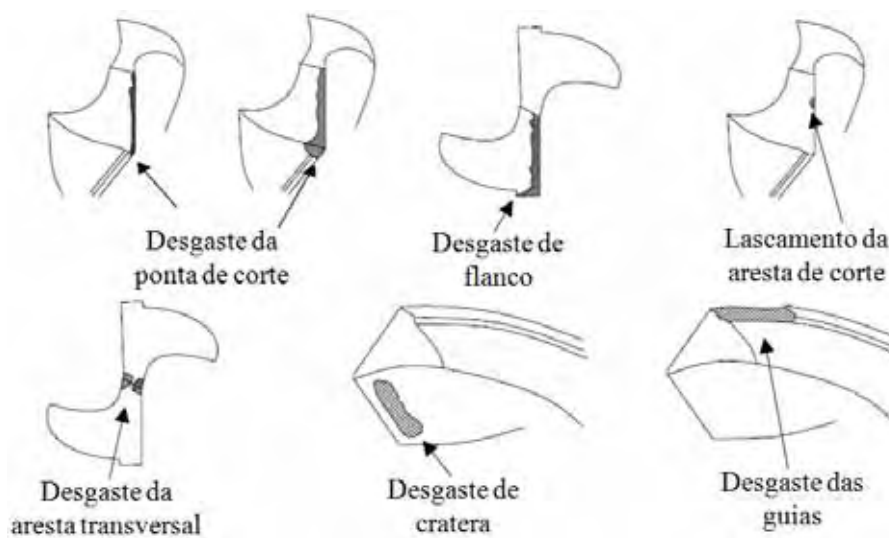


Figura 4. Formas de desgaste de uma broca. (Adaptado de SILVA; MACHADO; COSTA [s.d.])

De acordo com Abu-Mahfouz (2003), pesquisas que visam determinar o desgaste das ferramentas durante o processamento aterm-se exclusivamente ao desgaste de flanco, por se tratar de um desgaste progressivo e de mais fácil mensuração. O autor ressalta, contudo, que apesar de ser uma boa indicação da severidade do desgaste, outros tipos de desgaste

são de igual importância e podem ter influência igual ou superior na qualidade do furo produzido e em seu acabamento superficial.

Uma das principais implicações do desgaste da ferramenta, é que ele leva a alterações geométricas que causam um desbalanceamento nas forças de corte, e conseqüentemente maior vibração e impacto com a parede do furo (ABU-MAHFOUZ, 2003; JANTUNEN, 2002). Abu-Mahfouz (2003) afirma que a detecção do desgaste da ferramenta de corte é um dos primeiros passos à construção de um sistema de monitoramento de processo, já que afeta a capacidade de corte do sistema, influenciando em todos os seus resultados, a saber: diâmetro, circularidade dos furos, rugosidade, centralização e formação de rebarbas.

Como o principal modo de falha das ferramentas de usinagem é o desgaste, pode-se afirmar que a taxa de falhas de uma ferramenta tem uma ocorrência crescente no tempo. A confiabilidade do processo de desgaste de uma ferramenta utilizada em operações de usinagem representa a probabilidade de que, em um tempo T , o valor do desgaste da ferramenta atinja um nível tal que comprometa as tolerâncias exigidas no projeto.

Atualmente a utilização de máquinas-ferramenta mais modernas e com maior rigidez estrutural, potência disponível e velocidade de operação, permitem a utilização de condições de usinagem mais robustas, aumentando significativamente a produtividade dos processos de usinagem nelas desenvolvidas. Paralelamente, houve nos últimos anos uma enorme evolução na qualidade das ferramentas de corte que foi impulsionada não apenas pela necessidade de incremento das velocidades de corte, como também pela aplicação da usinagem de materiais endurecidos e de novas ligas. (MARCELINO et al, 2004).

A seleção assertiva do material e geometria da ferramenta, somado aos corretos parâmetros de usinagem e a boa estabilidade do sistema máquina-peça-ferramenta podem minimizar o desgaste da ferramenta de corte aumentando assim sua vida útil (BRAGA, 1999).

Os problemas de desgaste em ferramentas de corte sempre foram motivos de preocupação, devido ao controle dimensional e à necessidade de parada no processo para troca de ferramentas, significando custos adicionais e perda de produtividade.

4.2.3. PARÂMETROS DE CORTE E FORMAÇÃO DO CAVACO

O processo de usinagem em metais é altamente não linear e envolve fenômenos como a deformação plástica e elástica do material usinado, fratura, impacto, contato contínuo e/ou intermitentes de ponto único ou múltiplo, atrito e desgaste (ABU-MAHFOUZ, 2003).

Devido à precisão e ao sofisticado controle eletrônico existente nas modernas máquinas CNC e Robôs empregados atualmente na usinagem, o avanço e a velocidade de corte, uma vez definidos no modelamento de um processo de usinagem, podem ser assumidos como constantes. Contudo, esses parâmetros têm fundamental importância nos resultados da furação e a combinação ótima entre eles sempre deve ser cuidadosamente estudada durante o desenvolvimento do processo.

De acordo com Batzer et al. (1998) o avanço é entre todos os parâmetros controláveis, aquele que mais influência no tamanho do cavaco e no acabamento superficial da parede dos furos. Quando a velocidade de avanço é maior, aumenta a taxa de penetração da ferramenta na peça a cada ciclo de rotação sobre seu eixo, e com isso aumenta a espessura do cavaco gerado, conduzindo a uma porção maior de material, com maior dificuldade de deformação, o que dificulta a quebra.

Avanço e velocidade de corte são ainda responsáveis por variações na rugosidade, devido ao efeito de formação de rosca. Além disso, estes parâmetros têm influência na vibração da máquina ferramenta e flexão da ferramenta de corte, devido ao aumento das forças de corte e conseqüente torque requerido, o que afeta diretamente o diâmetro do furo usinado.

Em geral, na furação, cavacos pequenos e quebradiços são desejados. Isso ocorre, pois quando o cavaco cresce sua movimentação nos canais da ferramenta de corte torna-se mais difícil, o que causa um aumento do atrito entre o material cortado e a parede do furo, levando a uma necessidade de torque maior por parte da máquina ferramenta, elevando a temperatura do processo e causando prejuízos à forma e à rugosidade da parede do furo (PIRTINI; LAZOGLU, 2005).

Nos processos de usinagem, quando a ferramenta de corte entra na peça e retira material, há calor gerado devido à deformação plástica e ao atrito (CARVALHO; ABRÃO; RUBIO, 2004). A temperatura atingida no ponto de corte depende diretamente das condições de usinagem empregadas, tais como velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, presença ou ausência de fluido refrigerante, tipo de material da peça e da ferramenta e da geometria da broca (CARVALHO; ABRÃO; RUBIO, 2004).

Na broca, temperaturas elevadas aumentam o desgaste e também enfraquecem o material, diminuindo sua resistência ao cisalhamento. Na peça, o aumento da temperatura pode ser útil quando se considera que ela reduz a resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, diminui as forças de corte, e assim, a potência de usinagem, contudo pode também ocasionar problemas, provocando dilatação e subseqüentes erros de precisão dimensional, ou ainda, influenciar algumas propriedades do material, devido a possíveis alterações de sua microestrutura (KALIDAS; DEVOR; KAPOOR, 2001).

Particularmente no processo de furação, a formação do cavaco se dá de forma oculta, dificultando a refrigeração na região de corte e levando a um aumento de temperatura, o que propicia o aparecimento dos fenômenos de oxidação e difusão no desgaste da ferramenta (SCHROETER; WEINGAERTNER, 2001). Estes fenômenos são nitidamente percebidos quando as velocidades de corte não são adequadas à usinagem do material.

O aumento da temperatura do processo, principalmente na usinagem de materiais de baixo ponto de fusão causa a formação de arestas postiças de corte (APC). A formação da aresta postiça de corte se dá através da aderência térmica de parte do material do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta. O posterior fluxo de material sobre a parte aderida causa seu encruamento, eleva sua resistência e faz dela uma extensão da aresta cortante (FERRARESI, 2003).

Como reduz o ângulo de saída da ferramenta, a formação da aresta postiça diminui o valor das forças de corte. Apesar deste benefício, sua formação é responsável pela ocorrência de prejuízos, tais como: pobre acabamento superficial, desbalanceamento nas forças de corte e desgaste acelerado da ferramenta (FERRARESI, 2003).

A formação da aresta postiça de corte cresce com o aumento da velocidade de corte, uma vez que há uma relação direta desta com a temperatura do processo. Contudo, quando a temperatura do cavaco na região de interface entre o cavaco e a ferramenta atinge a

temperatura de recristalização do material usinado, cessa-se a formação da aresta postiça, uma vez que esta depende do encruamento do material, que não mais ocorre a temperaturas acima da recristalização. Dá-se o nome de velocidade crítica, a velocidade de corte limite de formação da aresta postiça de corte (FERRARESI, 2003).

Quando presente, o fluido de corte tende a diminuir o tamanho dos cavacos, uma vez que ele esfria o material cortado reduzindo assim sua ductilidade, o que favorece a quebra, ou lubrifica os canais de escoamento do cavaco favorecendo sua saída (PIRTINI; LAZOGLU, 2005).

Apesar da utilização de fluídos de corte trazer incontestável benefício ao controle térmico dos processos de usinagem, reduzindo os problemas anteriormente mencionados, a tentativa de se produzirem alternativas é facilmente percebida em ambientes industriais e em publicações acadêmicas, para a redução ou eliminação do fluído de corte durante a usinagem (SANTOS; ALMEDIA; TU, 1999; SCHROETER; WEINGAERTNER, 2001; MIRANDA, 2003; BIANCHI et al., 2010). Este fato deve-se aos transtornos provocados por essas substâncias, como: danos à saúde humana, problemas ambientais, altos custos operacionais e legislações cada vez mais rígidas.

4.2.4. MÁQUINAS FERRAMENTA E GEOMETRIA DA PEÇA USINADA

Este trabalho não objetiva discutir o projeto de máquinas ferramenta, tampouco aspectos aprofundados sobre a influência da geometria da peça fabricada. Entretanto, como o trabalho aborda ferramentas de monitoramento de processos de usinagem aplicados ao campo industrial, é importante observar que muitos problemas que podem ser encontrados no modelamento destes sistemas provêm desses fatores.

O tipo de máquina empregada no processo, com destaque à sua rigidez, seu sistema de fixação da peça de trabalho, o tipo de mandril utilizado e a sua manutenção, são alguns fatores que devem ser observados durante a arquitetura de um sistema de monitoramento (GUIBERT; PARIS; RECH, 2008).

Como exemplo, pode-se citar possíveis variações no diâmetro de furos produzidos por brocas fixadas em mandris gastos e que permitam montagens inclinadas em relação ao eixo que passa pelo centro geométrico do cabeçote ou do sistema de fixação. Esta montagem

deficiente acarretará em contato desbalanceado das arestas da ferramenta de corte e conseqüente vibração.

Outro exemplo é o desgaste excessivo das pistas dos rolamentos do motor do eixo do cabeçote da máquina. Quando o fim da vida de um mancal está próximo, o desgaste existente na pista de esferas ocasiona vibrações com alta amplitude durante o funcionamento do motor. Estas vibrações certamente influenciarão no resultado final do processo e devem ser, portanto, de alguma forma, detectadas pelo sistema de monitoramento utilizado, sendo que, em muitos casos, podem substanciar a manutenção preditiva da máquina (GUIBERT; PARIS; RECH, 2008).

Alterações na geometria das peças usinadas também podem dificultar significativamente a arquitetura do sistema de controle e monitoramento. Como exemplo disso pode-se citar peças ora com presença, ora com ausência de furos guias na peça de trabalho.

De acordo com Ralph et al. (2006), testes mostram que a presença de furos guias representa significativa diferença na qualidade dos furos e no desgaste das ferramentas. Essa diferença é ocasionada pela redução da quantidade de material removido pela aresta primária da ferramenta e pelo paralelismo do caminho gerado pelo guia, sendo que, na maioria dos casos, a presença de furo guia melhora a rugosidade dos furos.

Esses exemplos demonstram as influências que a máquina ferramenta e a geometria da peça produzida podem ter sobre o sistema planejado. Como regra, é possível afirmar que, quanto maior o número de variações possíveis, maior também a complexidade requerida do sistema de controle.

4.3. USINAGEM DE LIGAS UTILIZADAS NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA

Além dos itens anteriormente discutidos, os materiais a serem usinados influenciam de maneira expressiva na seleção dos parâmetros e resultados obtidos no processo de furação.

Neste tópico serão abordadas as características de ligas de Alumínio e ligas de Titânio, materiais largamente utilizados na indústria aeronáutica e que serviram de materiais bases para a concepção dos corpos de prova utilizados nos ensaios desta pesquisa.

A indústria aeronáutica está constantemente à procura de obter reduções no peso das estruturas para lograr melhorias nas características dinâmicas das aeronaves. A forma mais eficiente de conseguir tais ganhos de peso na estrutura se dá através da seleção de materiais de menor densidade.

A Figura 5 apresenta a distribuição de materiais utilizados em três aeronaves modernas fabricadas por diferentes empresas. A análise desta figura permite afirmar que, apesar de materiais compostos estarem ganhando espaço entre os materiais utilizados na fabricação de aeronaves, os metais, liderados pelo alumínio, ainda representam maioria absoluta na composição de aeronaves comerciais.

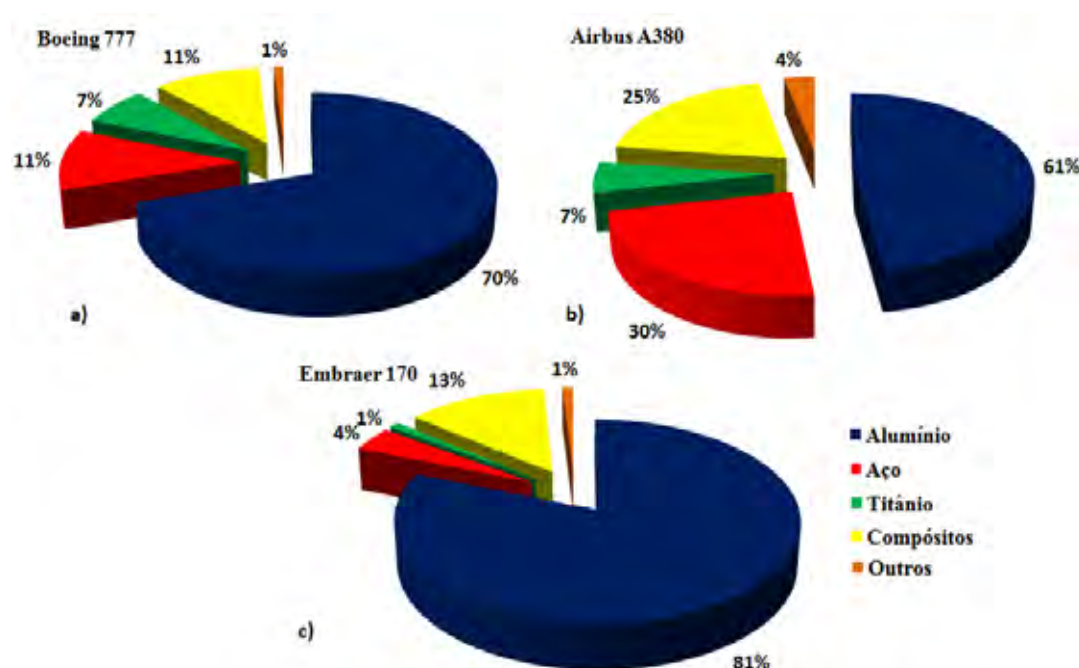


Figura 5. Percentual global dos materiais utilizados na fabricação de aeronaves.
(adaptado de MELO; DEL'ARCO, 2007). Distribuição % global em peso a) Boing 777; b) Airbus A380 e c) Embraer 170.

4.3.1. LIGAS DE ALUMÍNIO

O alumínio é um material de suma importância entre os metais vigentes na indústria. Dentre os metais não-ferrosos, se destaca por ter alta resistência à corrosão e apresenta um comportamento de melhor tenacidade a baixas temperaturas quando comparado aos metais ferrosos. O alumínio e suas ligas têm grande importância técnica devido a sua baixa densidade, elevada relação resistência/peso, endurecibilidade de muitas ligas, aparência, fabricabilidade, possibilidade de tratamento superficial e propriedades físicas e mecânicas (WEINGAERTNER et al., 1994; HATCH, 1984). Dentre os materiais de engenharia, a utilização do alumínio é uma das que mais cresce (HATCH, 1984).

A indústria aeronáutica e aeroespacial, frente às mudanças ocorridas nos últimos tempos no transporte aéreo de massa e com o desenvolvimento de novos produtos, exige uma disponibilidade maior de novos materiais, aos quais se tenha qualidade de informações suficientes para seu processamento (HEINZ et al., 2000). Dentre esses materiais, o alumínio possui uma importância significativa devido ao seu grande potencial de produção, principalmente na indústria nacional e sua grande quantidade de características físicas e mecânicas intrínsecas.

Atualmente, o esforço para redução de peso nas indústrias aeronáutica e automobilística, selecionando materiais mais leves, é tão importante quanto a redução nos custos de manutenção. Sendo assim, a seleção do material deve ser feita criteriosamente. Segundo Kolesnikov e Herbeck (2003), os conceitos propostos para redução de custos prevêm uma redução de peso na ordem de 20%, no entanto, é considerada realista uma previsão de redução de peso de cerca de 10% com a adoção de novos materiais metálicos e novas tecnologias de fabricação.

As indústrias automobilísticas e aeronáuticas desenvolveram numerosas ligas de alumínio que apresentam valores de resistência à corrosão e à tração bem elevadas. Isto foi possível com a adição de certos elementos de liga e adequados tratamentos térmicos e mecânicos. As ligas de alumínio são eficientes na substituição do aço na confecção de partes ou peças estruturais submetidas a tensões mecânicas elevadas, por possuírem uma boa relação densidade / tensão limite de escoamento (WEINGAERTNER et al., 1994).

As ligas de alumínio, segundo a Aluminum Association (AA), são divididas nas nove classes mostradas na Tabela 1 (HATCH, 1984):

Tabela 1 – Ligas de alumínio divididas em classes segunda a Aluminum Association (HATCH, 1984)

Série	Características
1xxx:	Série do alumínio puro (99,9%) ou comercial. Destacado pela resistência a corrosão, altas condutividades térmica e elétrica. Porém, apresenta baixa resistência mecânica.
2xxx:	O cobre é o principal elemento de liga. Se receberem tratamentos tais como solubilização e envelhecimento, ter-se-á grandes aplicações na indústria aeronáutica, devido a alta resistência mecânica.
3xxx:	O manganês é o principal elemento de liga. Não são ligas tratáveis termicamente, tendo como principal aplicação os produtos estampados.
4xxx:	O silício é o principal elemento de liga. Apresenta baixo ponto de fusão e impossibilidade de tratamento térmico. São utilizados também como material de adição para solda.
5xxx:	O magnésio é o principal elemento de liga. Sua aplicação é similar a da série 3xxx.
6xxx:	Ligas de Al-Mg-Si, tendo como resultado a fase Mg_2Si o que tornará possível o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento. Não são tão resistentes quanto as classes 2xxx e 7xxx, porém são utilizadas na fabricação de bicicletas, pois podem ser soldadas.
7xxx:	Ligas de Al-Zn. Dos tratamentos térmicos, resultam os mais altos índices de resistência mecânica e tenacidade. Ampla aplicação no setor aeronáutico.
8xxx:	O principal elemento de liga é o lítio. São tratáveis termicamente e apresentam alta resistência mecânica específica.
9xxx:	Outras ligas

Tomadas como base às propriedades mecânicas do Alumínio, as forças de corte necessárias para o processo de remoção de material são menores quando comparadas aos aços de baixo carbono e, por essa razão, a potência requerida para usinagem é menor. Embora algumas Ligas de Alumínio apresentem um limite de resistência equivalente ao de

alguns aços de baixo carbono em temperaturas ambientes, o mesmo não ocorre em temperaturas elevadas, onde o Alumínio apresenta resistência reduzida ao processo de remoção de material. Este fato favorece a potência requerida na usinagem destas ligas, uma vez que a elevação da temperatura é inerente ao processo de usinagem.

De modo geral, existe pouco conhecimento das vantagens que as ligas de alumínio podem oferecer com respeito a sua usinabilidade, principalmente porque estas ligas carregam um falso estigma de impróprias a esta operação. Entretanto, nota-se que se forem escolhidas as ligas de alumínio adequadas, aliadas as operações de usinagem otimizadas, é possível obter ótimos resultados, tanto em termos de qualidade da peça final, quanto em termos de custos (WEINGAERTNER et al., 1994). Nesta condição, a usinagem do alumínio comparada a outras ligas metálicas traz inúmeras vantagens, tais como: possibilidade de utilização de velocidades de corte elevadas, bom acabamento superficial, baixas forças e temperatura de corte, bom controle dimensional e longa vida da ferramenta de corte. Na maioria das ligas trabalhadas a frio o desgaste é bem menor que o apresentado em na usinagem dos aços (WEINGAERTNER et al., 1994).

Os elementos acrescentados ao alumínio na formação da liga a fim de conferir-lhe propriedades superiores, afetam também sua usinabilidade. As ligas de Magnésio e Silício (Al-Mg-Si) e Magnésio e Zinco (Al-Mg-Zn), séries 6xxx e 7xxx respectivamente, apresentam influência benéfica sobre a usinabilidade do material, uma vez que fragilizam os cavacos e permitem o uso de ferramentas com ângulos de cunha maiores, mais robustas e duráveis. (WEINGAERTNER et al., 1994). Elementos insolúveis no alumínio, que baixam o ponto de fusão da liga, tais como o chumbo, estanho e cádmio também trazem benefícios a usinabilidade uma vez que precipitam na forma de pequenos glóbulos imersos na matriz, gerando descontinuidades que fragilizam o material (HATCH, 1984).

Ao contrário dos anteriores, a adição de silício às ligas de alumínio (ex.: ligas da série 4xxx) aumenta a capacidade abrasiva do material base, aumentando o processo de desgaste, e conseqüentemente reduzindo a vida da ferramenta (HATCH, 1984).

Ligas não tratáveis termicamente e as tratáveis no estado recozido tendem a formar cavacos contínuos e em formas de fita na usinagem, apresentar acabamento superficial ruim e elevada tendência de empastamento na ferramenta de corte (WEINGAERTNER et al., 1994).

4.3.2. LIGAS DE TITÂNIO

Constata-se que o titânio e suas ligas são normalmente utilizados na indústria aeronáutica e aeroespacial, em componentes como longarinas, fuselagem, reforçadores estruturais e prendedores. Trata-se de um excelente material na aplicação de componentes estruturais, devido à sua alta resistência mecânica, baixa massa específica, boa resistência à corrosão e estabilidade metálica.

A alta resistência do titânio à fluência tem sido de grande importância para uso em motores (NORRIS, 1994). Porém, a afinidade do titânio com oxigênio se apresenta como um dos principais fatores limitantes de sua aplicação como material estrutural em altas temperaturas. Durante a exposição ao ar e sob elevadas temperaturas, a solubilidade sólida do oxigênio no titânio resulta em perda de material e na formação de uma frágil camada de alta dureza. A reatividade do titânio com o nitrogênio é parecida com a do oxigênio, onde uma camada de óxido é formada na superfície, como um nitreto (ABKOWITZ; BURKE; HILTZ JR., 1955).

Nas últimas décadas, houve avanços significativos no desenvolvimento de ligas de titânio com o objetivo de aumentar suas propriedades em fluência, apesar da oxidação superficial limitar o uso destas ligas em temperaturas superiores a 600°C (SECO; IRISSARI, 2001).

A indústria aeroespacial utiliza cerca de setenta e cinco por cento (75%) da produção mundial de titânio, sendo a liga Ti6Al4V uma das mais utilizadas. Uma das características que mais tem contribuído para seu crescimento deve-se ao seu uso para fins estruturais, no que se refere ao alto ponto de fusão. O uso da liga Ti6Al4V concentra-se na área aeroespacial, onde as resistências à fluência, fadiga e degradação são consideradas essenciais (NORRIS, 1994). Esta liga apresenta ainda, vasta importância comercial, complementando com mais da metade das aplicações das ligas de titânio nos Estados Unidos da América e Europa, por oferecer a possibilidade de alta resistência à tração e boa capacidade de conformação, apesar de apresentar redução de soldabilidade.

Estas ligas apresentam baixa condutividade térmica e elétrica. São materiais leves, fortes e de fácil fabricação com baixa densidade (quarenta por cento da densidade do aço). Quando puros são bem dúcteis e fáceis de trabalhar. O ponto de fusão relativamente alto faz com que seja útil como um metal refratário.

Se comparado com o alumínio, o titânio é sessenta por cento (60%) mais pesado, porém duas vezes mais resistente. Tais características fazem com que o titânio seja muito resistente contra os tipos usuais de fadiga. Esse metal forma uma camada passiva de óxido quando exposto ao ar, mas quando está em um ambiente livre de oxigênio ele é dúctil. Ele queima quando aquecido e é capaz de queimar imerso em nitrogênio gasoso.

O titânio apresenta duas formas alotrópicas, denominadas de fase alfa (α) e fase beta (β). A primeira apresenta estrutura cristalina hexagonal compacta a temperatura ambiente, que se transforma alotropicamente a 882 °C para a segunda fase, com estrutura cristalina na forma de cúbica de corpo centrado (SECO; IRISSARI, 2001).

Neste material, a presença de elementos de liga tende a estabilizar uma de suas fases. Elementos alfanêgicos, como o alumínio e o estanho, aumentam a temperatura de transformação alotrópica enquanto que elementos betagênicos, como o vanádio, nióbio e tântalo reduzem a temperatura de transformação.

De acordo com Bhaumik (1995), a usinagem da liga de titânio é muito dificultada pela sua alta reatividade química com os materiais da ferramenta e sua baixa condutividade térmica gerando alta temperatura na interface cavaco/ferramenta/peça o que favorece o mecanismo de difusão e conseqüente desgaste prematuro da ferramenta. Segundo Ezugwo (1997), na usinagem das ligas de titânio, cerca de oitenta por cento (80%) do calor gerado fica retido na ferramenta e apenas vinte por cento (20%) se dissipa com o cavaco. Além da baixa condutividade térmica, o baixo módulo de elasticidade do titânio, quando comparado ao de aços, por exemplo, provoca forças pulsantes durante sua usinagem causando maiores atritos e vibrações.

4.3.3.FADIGA DE COMPONENTES AERONÁUTICOS

A maioria dos componentes mecânicos encontrados em máquinas, veículos e estruturas estão freqüentemente submetidas a esforços repetitivos, também chamados de carregamentos cíclicos, que podem causar danos microscópicos irreversíveis ao componente solicitado (DOWLING, 1999).

Chama-se de fadiga mecânica, o processo de danificação dos materiais associados a o acúmulo destes danos, que podem ocorrer até atingirem a forma macroscópica, podendo levar à falha catastrófica do componente (DOWLING, 1999).

As cargas de fadiga têm valores inferiores às cargas estáticas dimensionantes do projeto de uma aeronave. De acordo com a FAA (Federal Aviation Administration), órgão responsável pela certificação e homologação de aeronaves no território norte-americano, as cargas estáticas dimensionantes de uma estrutura aeronáutica devem ser as denominadas cargas limite e cargas "ultimate" (FAR PART 25, 2002).

Define-se como carga limite o carregamento máximo esperado durante a operação de uma aeronave, e como carga "ultimate" o carregamento limite multiplicado por um fator de segurança, que depende do componente, da manobra realizada e do número de sua ocorrência por missão. Como critério de sucesso a norma, este órgão define que a estrutura de componentes aeronáuticos deve suportar a carga limite sem a existência de deformação permanente ou plástica, e a carga "ultimate" sem ruptura ou falha catastrófica (FAR PART 25, 2002).

De uma forma simplificada, a fuselagem de uma aeronave pode ser dividida em três secções principais: dianteira, central e traseira. As cargas predominantes durante um vôo comum são as cargas aerodinâmicas que causam flexões e torções na fuselagem, asas e empenagens. Os esforços resultantes destes carregamentos causam esforços de tração, compressão, flambagem e cisalhamentos. A Figura 6 mostra as principais cargas envolvidas em cada região da aeronave.

Apesar do carregamento de fadiga ser geralmente muito inferior à carga estática limite e, conseqüentemente, ao limite de escoamento do material, o elevado número de ciclos destes carregamentos pode submeter a estrutura ao colapso. Estima-se que 90% das falhas em peças metálicas ocorridas no mundo são oriundas de problemas com a fadiga dos materiais (HEINZ et al, 2000; NORTON, 2005; CALLISTER JR., 2006).

Os custos anuais com falha por fadiga nos Estados Unidos, segundo Dowling (1999), são altíssimos. Em 1982, estes custos já ultrapassavam a marca de 100 bilhões de dólares, com danos causados a estruturas de veículos, aviões, pontes e indústrias petrolíferas, entre outros. Além do custo, estas falhas também podem envolver riscos à vida humana,

provocando desastres aéreos, como por exemplo, os desastres sofridos com os aviões da British Comet, em 1954.

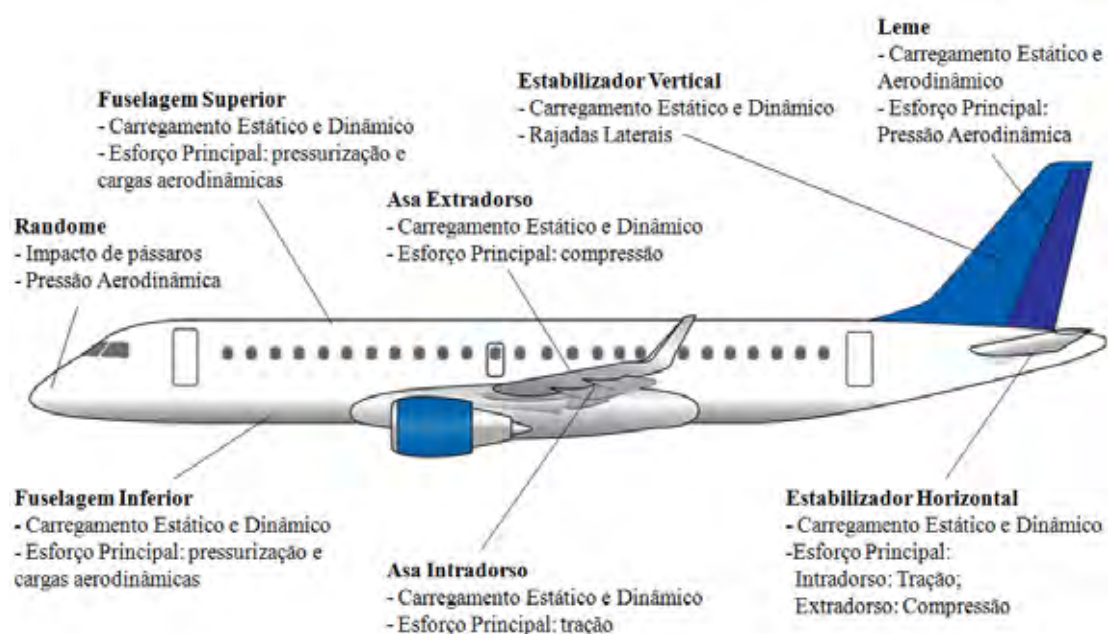


Figura 6. Principais cargas envolvidas na operação de uma aeronave (REZENDE, 2007 - Adaptado)

Há algumas décadas, as aeronaves eram projetadas em um critério denominado de *"Save Life"*. Este critério restringia a existência de trincas nos componentes aeronáuticos durante sua vida, geralmente medida em horas de voo ou operação. As estruturas eram condenadas ao descarte e à substituição toda vez que fosse detectada a existência de uma trinca ou fosse atingido o número de horas ao qual o componente foi projetado.

Este critério levou os Estados Unidos a construírem os denominados cemitérios de aeronaves, sendo o mais famoso deles é o cemitério localizado no deserto de Monjave, no estado da Califórnia, que abriga hoje mais de 4.400 aeronaves civis e militares.

O avanço das técnicas e cálculos estruturais e o conhecimento mais profundo dos materiais possibilitaram a inserção de um novo conceito ao projeto aeronáutico, denominado de *"Fail Safe"*. Por este critério, se aceita a presença de trincas na estrutura, e através de métodos de cálculos e estatística, estima-se o comportamento de colapso da

estrutura, principalmente no que se refere à velocidade de propagação de trincas (DOWLING, 1999).

Hoje, uma aeronave projetada para 20.000 horas de vôo não está mais fadada ao descarte no momento que atingir esta idade, porém é importante ressaltar que, neste momento, sua operação torna-se mais cara e onerosa, pois aumentam os custos decorrentes de maior frequência de inspeção e manutenção para operação.

Por estes motivos, a qualidade da usinagem dos componentes estruturais de uma aeronave é fundamental para sua vida em fadiga.

De acordo com Liu et al. (2006), a maior parte da carga dimensionante da aeronave é transferida da fuselagem aos reforçados estruturais (perfis, longarinas e cavernas), através de prendedores instalados em furos ao redor das juntas.

Em um pequeno jato, de quatro a seis passageiros, são utilizados em torno de 30 a 50 mil prendedores, apenas na fuselagem externa. A maior parte destes prendedores são rebites ou pinos. A má qualidade ou perda de tolerância nestes furos causam uma sensível redução na vida em fadiga da aeronave, devido à existência de concentradores de tensão, corrosão e princípio de trincas (LIU et al., 2006).

A ação mecânica exercida pela broca deforma plasticamente a zona ao redor da superfície do furo. Estas pequenas irregularidades aumentam a probabilidade de se verificar uma iniciação de fissura, devido ao aumento de tensões localizadas.

4.4. ERROS MICRO-GEOMÉTRICOS E MACRO-GEOMÉTRICOS RESULTANTES DO PROCESSO DE USINAGEM

Apesar do desenvolvimento tecnológico, é impossível obter superfícies perfeitamente exatas. Todas as peças, por mais precisas que sejam, apresentam erros de forma, que correspondem à diferença entre a superfície real da peça e a forma geométrica teórica (AGOSTINHO, RODRIGUES E LIRANI, 1981).

Os principais erros geométricos podem ser classificados como: erros macro geométricos e erros micro geométricos. Os primeiros estão ligados a falta de retineilidade,

planeza, circularidade, paralelismo, posicionamento, entre outros; enquanto que o segundo destaca-se a rugosidade.

As superfícies de peças apresentam irregularidades quando observadas em detalhes. Estas irregularidades são provocadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça.

A importância do estudo do acabamento superficial aumenta na medida em que cresce a precisão de ajuste entre as peças a serem acopladas, onde somente a precisão dimensional, de forma e de posição não é suficiente para garantir a funcionabilidade do par acoplado.

Agostinho, Rodrigues e Lirani (1981) descrevem a rugosidade como micro-irregularidades geométricas decorrentes do processo de fabricação. Sua quantificação é feita pelos parâmetros de altura e largura das irregularidades, medidos geralmente por perfilômetros de contato mecânico, também conhecidos como rugosímetros.

Os processos de usinagem afetam diretamente a rugosidade superficial da peça e o controle da mesma é feito pelo gerenciamento e otimização dos processos e condições de usinagem. As alterações da rugosidade ocorrem em função do tipo da ferramenta, afiação da ferramenta, condições de usinagem, dentre outros (FUSSE et al., 2004).

O acabamento superficial sofre influência de vários parâmetros de usinagem, incluindo: a geometria da ferramenta de corte, geometria da peça, rigidez da máquina-ferramenta, material da peça, condições de corte, material da ferramenta (FUSSE et al., 2004).

Diversos são os parâmetros de rugosidade medidos pelos rugosímetros, sendo cada qual mais aplicada a determinada situação. No Brasil, o mais utilizado deles é a rugosidade média aritmética (Ra) que é calculada a partir da média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição.

4.5. SISTEMAS DE CONTROLE E MONITORAMENTO DE PROCESSOS

A grande competição entre as empresas e a crescente busca pelo aumento de eficiência nos processos fazem com que as indústrias invistam em novas tecnologias e busquem alternativas para redução de custos, principalmente em períodos de turbulência econômica e crise financeira.

Neste contexto, o controle avançado de processos ganha espaço por permitir que a planta opere em condições próximas aos limites de operação, trabalhando na direção do máximo de produção e com a mínima variabilidade na qualidade do produto.

De acordo com Groover (1994), a aplicação de controle a automação industrial têm o potencial de aumentar a produtividade, reduzir custos, aumentar a qualidade, a repetibilidade e a flexibilidade de processos industriais, tornando-o capaz de verificar seu próprio funcionamento e agir sobre ele mesmo, reduzindo a necessidade da intervenção humana.

Em qualquer processo industrial, as condições de operação estão sujeitas às variações ao longo do tempo. Controlar um processo significa atuar sobre ele, ou sobre as condições a que o processo está sujeito, de modo a atingir algum objetivo. Por exemplo, pode-se achar necessário ou desejável manter o processo sempre próximo de um determinado estado estacionário, mesmo que efeitos externos tentem desviá-lo desta condição. Este estado estacionário pode ter sido escolhido por atender melhor aos requisitos de qualidade e segurança do processo.

Para se controlar um processo é geralmente necessário obter um modelo matemático que atenda as características do sistema. Com a utilização dos computadores nos controles de processos, os cálculos passaram a integrar os sistemas o que potencializou seu uso. Contudo, dificilmente estes modelos conseguem prever ou contornar situações que na prática são prejudiciais as ações de controle (OGATA, 2003).

Além disso, sistemas de controle tradicionais geralmente baseiam-se no modelamento matemático do processo, contudo, a obtenção de um modelo matemático para um processo de usinagem é geralmente dificultosa, devido ao grande número de variáveis relevantes e sua complexa interação e alteração ao longo do tempo (ABU-MAHFOUZ, 2003).

Para suprir esta carência, métodos indiretos de medição e avaliação são utilizados. Nestes sistemas, sensores são geralmente empregados para antever falhas inesperadas. Sistemas como esses têm tido expressiva evolução na realização de sistemas de manufatura avançada. Entretanto, também não é tarefa fácil decidir qual sensor utilizar para registrar as variações relevantes no processo. (ABU-MAHFOUZ, 2003; NOORI-KHAJAVI; KOMANDURI, 1995)

Sensores associados a sistemas computacionais inteligentes foram utilizados com sucesso em inúmeros trabalhos. Recentemente, alguns exemplos podem ser vistos nas publicações de Guibert, Paris e Rech (2008), Ozel e Karpas (2005), e Aguiar et al. (2008), respectivamente para torneamento, fresamento e retificação. No primeiro caso, um sensor de força foi utilizado. No fresamento foram utilizados um acelerômetro e um sensor de proximidade e finalmente para a retificação, foi lida a corrente do motor elétrico, utilizando sensores de efeito Hall e emissão acústica. Em todos os casos, a rugosidade e o desgaste da ferramenta foram preditos com sucesso.

Na furação dois métodos de monitoramento de processo foram estudados. Estes métodos podem ser classificados como diretos ou *off-line* e indiretos ou *on-line*. Métodos diretos usualmente utilizam sistemas ópticos para medir a geometria do furo ou da perda de aresta da ferramenta pela análise direta da imagem coletada, enquanto que, métodos indiretos utilizam sensores para ler grandezas associadas ao processo. A principal desvantagem dos métodos diretos está na dificuldade de medição contínua, pois a ferramenta e o furo não podem ser observados durante o corte, enquanto que métodos indiretos fazem a leitura contínua do processo (NOORI-KHAJAVI; KOMANDURI, 1995).

Métodos *on-line* de medição, como sensores de força, acelerômetros e sensores de emissão acústica, a princípio podem ser facilmente utilizados, pois eles não interferem na operação de corte. Por outro lado, é difícil obter uma boa correlação entre esses sinais adquiridos e os resultados obtidos no processo (NOORI-KHAJAVI; KOMANDURI, 1995).

De acordo com Lin e Ting (1996) dentre os inúmeros sistemas sensoriais disponíveis, o sensor de efeito Hall, para medição da corrente elétrica do motor do cabeçote da máquina, é um dos mais efetivos sistemas de controle de processos de usinagem. A maior vantagem

da utilização desse tipo de sensor é o fato dele ser instalado longe do ponto de corte, em um circuito elétrico independente, não tendo qualquer influência sobre o processo. Soma-se a isso, o fato de ele ser um dos mais baratos sistemas sensoriais disponíveis.

De acordo com Abu-Mahfouz (2003), acelerômetros são de simples operação e também não tem influência sobre a rigidez ou sobre processo em si. Além disso, são de simples montagem e apresentam boa resistência à degradação pelo fluido de corte e cavacos e sofrem baixas ou nenhuma influência de eletromagnetismo e variações térmicas. Para sua boa operação, precisam, contudo ser montados próximo ao ponto de corte (GUIBERT; PARIS; RECH, 2008).

Os procedimentos de monitoramento baseados em vibrações mecânicas fundamentam-se no fato de que os sistemas mecânicos, com partes móveis e com ciclo de movimento fechado e repetitivo, como ocorrem no processo de furação, são compostos de elementos flexíveis que oscilam em torno de suas posições de equilíbrio estático, devido às excitações dinâmicas oriundas das vibrações de esforços dinâmicos que atuam sobre o sistema como, por exemplo, massas desbalanceadas, força de inércia e outras (EL-WARDANY; ELBESTAWI, 1996).

De acordo com Abu-Mahfouz (2003), sensores de emissão acústica (EA) são mais caros que acelerômetros industriais, e sua aplicação exige uma alta taxa de aquisição, utilização de filtros, sistema de armazenamento de dados e alta memória computacional. Essas exigências estão associadas ao seu projeto feito para captar sinais de altas frequências resultantes da deformação dos materiais, fratura, e quebra de cavaco.

Por outro lado, de acordo com Abu-Mahfouz (2003), a grande vantagem na aplicação de sensores emissão acústica é sua alta sensibilidade e exclusividade em ler alguns fenômenos do processo, sendo que dentre eles, pode-se citar a capacidade do sensor em captar a energia dissipada durante a retração elástica dos materiais após a ruptura da porção cortada ou quebra do cavaco.

Sensores de força apresentam como principal vantagem o fato de lerem diretamente umas das variáveis mais importantes e influentes no processo. Apesar disso, de acordo com Abu-Mahfouz (2003), medir o torque e a força de avanço durante o processo requer instrumentação cara, como o uso de dinamômetros, e na maioria dos casos necessita de um

sistema de fixação especial, o que pode influenciar na dinâmica e rigidez características do sistema de furação.

Um sistema de controle confiável permite operar próximo aos limites impostos pela segurança, pelo meio-ambiente e pelo processo (temperatura máxima, pureza mínima), o que permite alterar as condições de operação normais para uma condição mais favorável.

A seleção de uma boa estratégia de controle permite reduzir o tempo de produção fora da especificação e, conseqüentemente, melhora o resultado econômico do processo. As técnicas de controle e monitoramento de processos existem há vários anos e tem consolidado grandes avanços tecnológicos ao longo do tempo.

4.6. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Uma das áreas de pesquisa mais fascinante atualmente é a simulação de capacidades cognitivas de um ser humano. O objetivo desta ciência é de projetar máquinas capazes de exibir um comportamento inteligente como se fossem reações humanas.

Como base de processamento, o cérebro contém os neurônios, células que interconectados em redes permitem a troca de informação, criando a inteligência biológica. Dentro desta ciência há a tentativa de copiar a estrutura e o funcionamento do cérebro em um ambiente técnico. Isso significa que a pesquisa tenta entender o funcionamento da inteligência residente nos neurônios e mapeá-la para uma estrutura artificial, por exemplo, uma combinação de hardware e software, assim transformando as redes neurais biológicas em redes neurais artificiais (TAFNER, 1999).

4.6.1. MODELO DE NEURÔNIO BIOLÓGICO

O neurônio biológico, ou célula nervosa é o principal componente do sistema nervoso. Estima-se que no cérebro humano existam aproximadamente 100 bilhões de neurônios, responsáveis por todas as funções do sistema nervoso.

A Rede Neural Humana é baseada nesses conjuntos de neurônios, onde todas as funções e movimentos do organismo estão relacionados ao funcionamento destas pequenas células (CARVALHO, 2004).

No cérebro humano ocorrem várias reações químicas e impulsos elétricos que representam os processamentos de cada neurônio. As Redes Neurais Artificiais procuram reproduzir estas reações e impulsos químicos através de funções matemáticas e algoritmos iterativos de atualização de pesos.

As principais partes do neurônio biológico podem ser observadas na Figura 7.

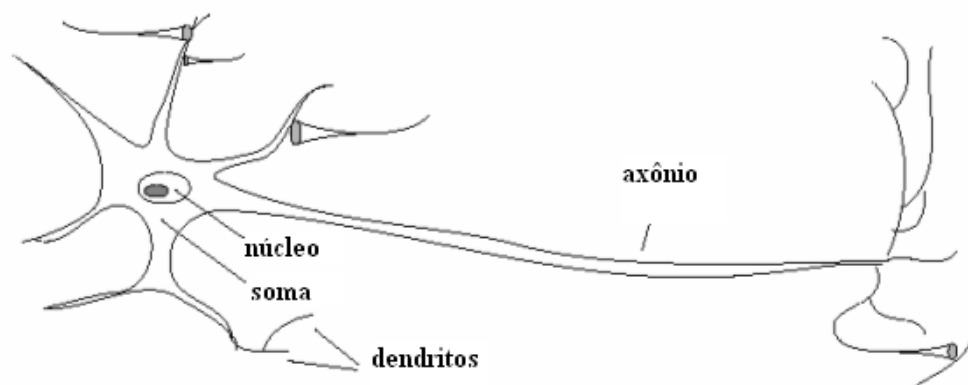


Figura 7. Estrutura do neurônio biológico (adaptado de <http://www.icmc.usp.br>)

Os principais elementos que compõem esta célula são o corpo celular, os dendritos e os axônios.

O Corpo Celular é também chamado de soma, e é formado por um conjunto de estruturas celulares, como núcleo, citoplasma e suas organelas. Sua principal função é dar suporte metabólico para manter a célula viva, além de ser responsável por coletar e combinar informações vindas de outros neurônios (CARVALHO, 2004).

Os dendritos são prolongamentos na forma de ramificações que normalmente formam uma árvore dendrital que pode ter um volume maior que o corpo celular. Possuem poucos milímetros de comprimento e têm como função fazer a comunicação entre os neurônios através das conexões sinápticas possuindo para isso uma região receptora e outra efetora;

Os axônios são também chamados de fibras nervosas e são extensões tubulares, longas e únicas encontradas no corpo celular. São responsáveis por transmitir impulsos elétricos para outras células (CARVALHO, 2004).

De acordo com Tafner (1998), o neurônio pode ser considerado um dispositivo computacional a base de carbonos que possui muitas entradas e uma única saída. Os estímulos de entrada são recebidos através de ligações, denominadas de sinapses, entre os dendritos e os axônios de outras células. As informações fluem, em forma de impulsos elétricos do axônio para o dendrito. No próximo neurônio, esta informação é então processada e, através de funções ativadoras ou inibidoras, é produzida a resposta.

A transferência de um impulso elétrico se dá pela sinapse e é feita por mediadores químicos que processam em sentido único, do axônio para o dendrito. A substância responsável pela emissão do impulso elétrico é chamada de neurotransmissor. Sua intensidade varia de acordo com sua concentração, dimensão geométrica da sinapse e distância do axônio ao neurônio (CARVALHO, 2004).

4.6.2. MODELO DE NEURÔNIO ARTIFICIAL

Assim como o sistema nervoso é composto por bilhões de células nervosas, a rede neural artificial também é formada por várias unidades de processamento, ou neurônios artificiais, que são pequenos módulos que simulam o funcionamento de um neurônio biológico.

Estes módulos são ligados por conexões sinápticas, que estão associadas a determinados pesos. As unidades fazem operações apenas sobre seus dados locais, que são entradas recebidas pelas suas conexões. O comportamento inteligente de uma rede neural artificial vem das interações entre as unidades de processamento da rede (TAFNER, 1998).

Para simular o comportamento das sinapses, os terminais de entrada do neurônio são influenciados por pesos sinápticos, cujos valores podem ser positivos ou negativos. O efeito de uma sinapse no neurônio é dado pela multiplicação do peso pelo seu valor de entrada. A estrutura de um neurônio artificial pode ser observada na Figura 8.

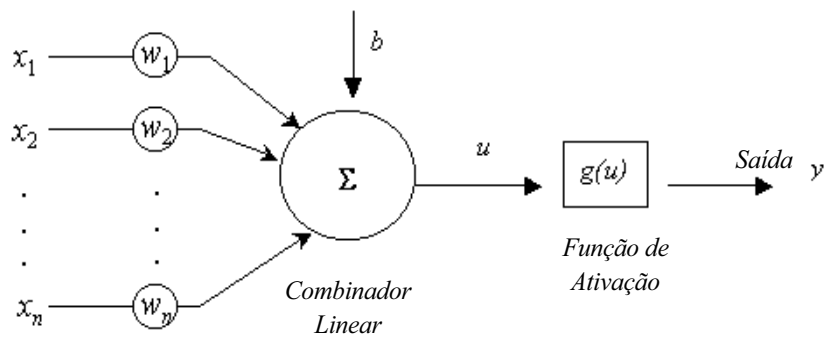


Figura 8. Estrutura do neurônio artificial (TAFNER, 1999 - Adaptado)

De forma resumida pode-se dizer que um neurônio artificial funciona através da multiplicação dos dados apresentados em sua entrada pelo peso sináptico de sua próxima ligação ou camada de saída. Neste momento é feita a soma ponderada dos sinais, através da função de transferência ou ativação, e caso esse valor exceda um determinado nível de atividade, chamado de limite de ativação (“*threshold*”), a unidade neural produz uma saída. As equações básicas de funcionamento das redes neurais são mostradas abaixo:

$$u = \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_i + b \quad (1)$$

$$y = g(u) \quad (2)$$

onde:

$x_1, x_2, \dots, x_N$ são os sinais de entrada;

$w_1, w_2, \dots, w_N$ são os pesos ou conexões sinápticas;

b_N é o limiar de ativação do neurônio;

u_N é a saída do combinador linear;

$g(u)$ é a função de ativação (limita a saída do neurônio);

y é o sinal de saída do neurônio.

A escolha da função de ativação depende do problema estudado. Sua função é de processar o sinal de entrada e transformá-lo em estado de ativação. Para isso as funções mais comumente usadas são:

•*Função degrau*: fornece uma saída de dados binária (0,1) ou bipolar (-1,1). Com esta função, a saída do neurônio assumirá o valor 1 se o nível de atividade interna total do neurônio for não-negativo, caso contrário a saída do neurônio assumirá o valor 0 ou -1.

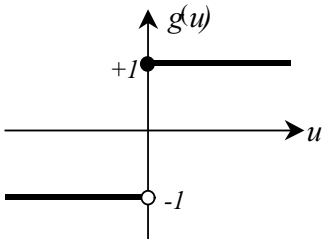
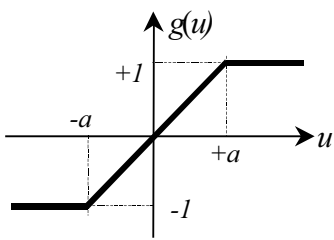
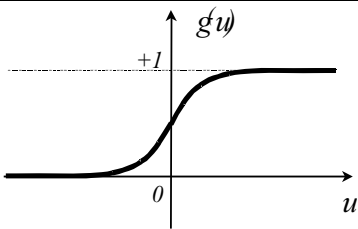
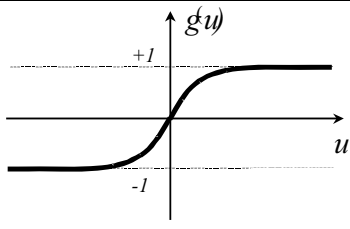
•*Função Rampa*: Função linear onde a saída pode assumir valores reais entre -1 e 1, dentro do limite dos valores de abscissa dados pela inclinação da reta.

•*Função Sigmóide*: Função exponencial onde o expoente da função é o parâmetro que define a inclinação (ganho) da função. Nesse tipo de função, a saída do neurônio assumirá valores reais entre 0 e 1.

•*Função Tangente Hiperbólica*: Similar à função sigmóide esta função apresenta gráfico em formato de arco hiperbólico com saídas limitas a -1 e 1.

A Tabela 2 mostra a representação gráfica e a equação das funções de ativação descritas acima.

Tabela 2 – Funções de ativação típicas utilizadas por redes neurais artificiais

Função Degrau (bipolar)	Função rampa
	
$g(u) = \begin{cases} 1 & \text{se } u \geq 0 \\ -1 & \text{se } u < 0 \end{cases}$	$g(u) = \begin{cases} 1 & \text{se } u \geq a \\ u & \text{se } -a < u < a \\ -1 & \text{se } u \leq -a \end{cases}$
Função Sigmóide	Função Tangente Hiperbólica
	
$g(u) = \frac{1}{1 + e^{(-\beta u)}}$	$g(u) = \tanh(u) = \frac{1 - e^{-u}}{1 + e^{-u}}$

4.6.3. TOPOLOGIA DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As redes neurais podem ser formadas por uma ou mais camadas de neurônios sendo que a escolha da topologia de uma rede é um fator importante na obtenção de sucesso em sua aplicação.

Basicamente, a estrutura de uma rede neural artificial se divide em três partes, sendo elas: a camada de entrada, onde os padrões de entrada são apresentados à rede; as camadas intermediárias, onde grande parte do processamento é executado, através de ligações ponderadas; e a camada de saída que apresenta o resultado final.

A Figura 9 mostra a estrutura básica de uma rede neural artificial.

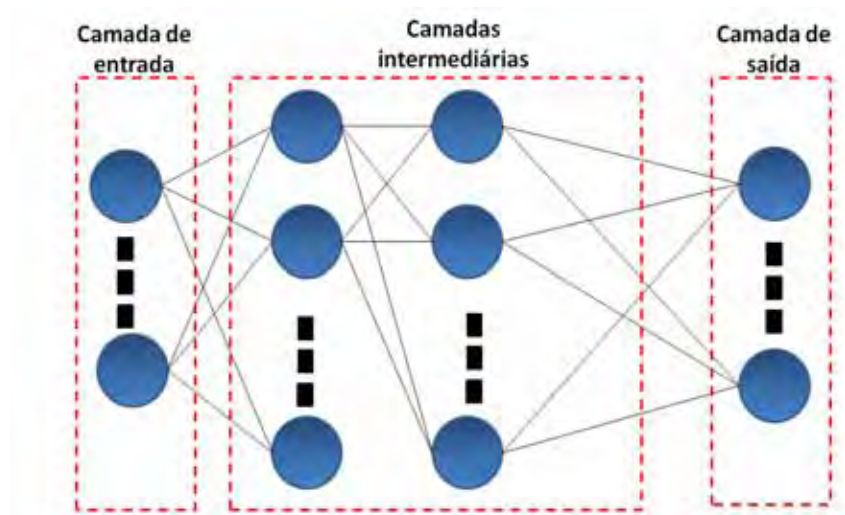


Figura 9. Estrutura básica de uma rede neural artificial (adaptado de HAYKIN, 2001)

Redes neurais são também classificadas de acordo com a arquitetura (estrutura) em que foram implementadas, características de seus nós, regras de treinamento e tipos de modelos de neurônio empregados. Do ponto de vista topológico, Haykin (1999) classifica as RNA em três classes de arquiteturas fundamentalmente distintas, sendo elas: redes *Feedforward* de Camada Única, *Feedforward* Multicamadas e redes Recorrentes.

As redes *Feedforward* de camada única caracterizam-se por apresentar uma camada de entrada e uma única camada de neurônios que já é a própria saída da rede, justificando seu nome. A Figura 10 mostra o esquema representativo deste tipo de rede.

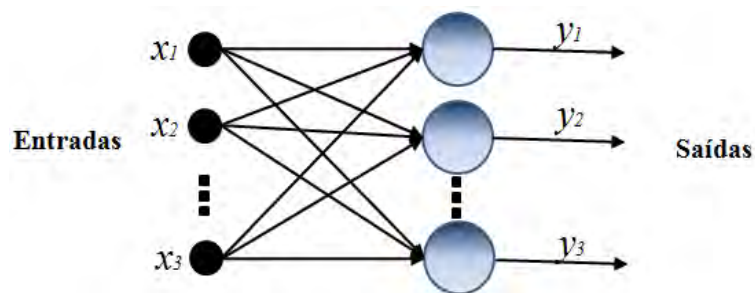


Figura 10. Estrutura da rede *Feedforward* de única camada (adaptado de HAYKIN, 2001)

As redes *Feedforward* têm aplicação na resolução de problemas que envolvem memória associativa e reconhecimento de padrões.

As redes *Feedforward* de múltiplas camadas se distinguem da anterior pela presença de uma ou mais camadas escondidas de neurônios. São aplicadas em reconhecimento de padrões, aproximador universal de funções e em controle, como será visto mais adiante. A Figura 11 mostra a arquitetura deste tipo de rede.

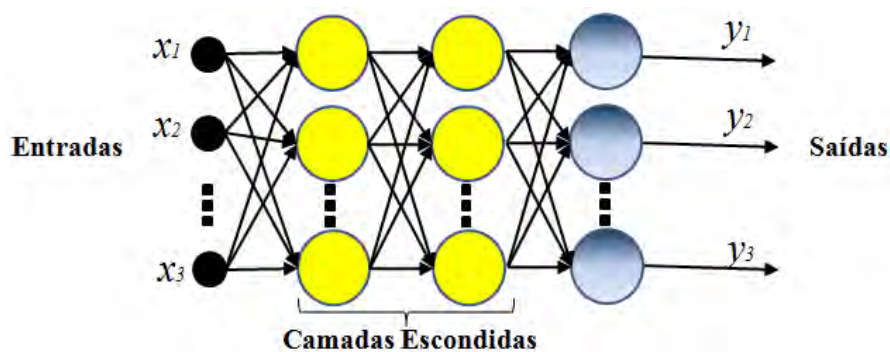


Figura 11. Estrutura da rede *Feedforward* de múltiplas camadas (Adaptado de HAYKIN, 2001)

As redes recorrentes distinguem-se das *Feedforward* por apresentarem ao menos um laço de realimentação entre neurônios de camadas diferentes, mostrado na Figura 12. Estas redes têm capacidade de “lembrar” seu comportamento com relação aos padrões anteriormente apresentados, e desta forma, processar seqüência de informações. Suas

principais aplicações são em sistemas dinâmicos, memórias associativas, previsão e estimação, otimização e no controle.

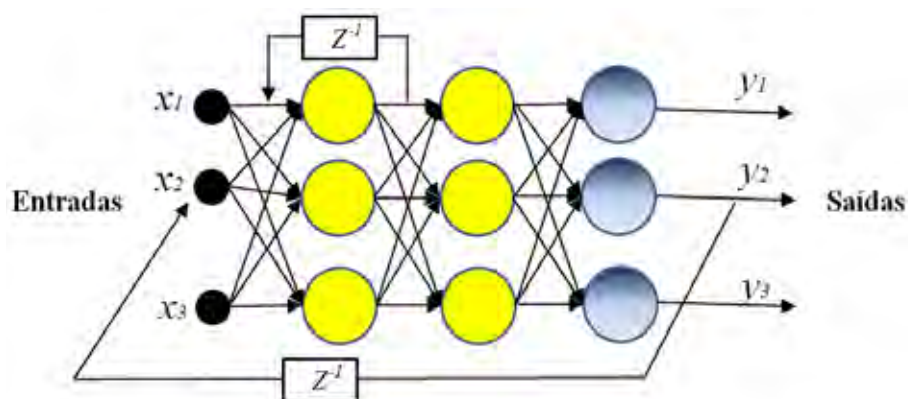


Figura 12. Estrutura da rede associativa (Adaptado de HAYKIN, 2001)

4.6.4. TREINAMENTO DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

A principal característica que adjectiva uma rede neural artificial como um sistema inteligente é a sua capacidade de aprendizado com a experiência. Depois de treinada, a rede é capaz de generalizar e extrapolar soluções.

O conhecimento contido em uma rede está representado em sua estrutura e nos pesos sinápticos das conexões entre os neurônios. Deste modo, ao se modificar os pesos, pode-se atualizar os conhecimentos contidos, induzindo a adaptação do sistema. A este processo de modificação dos pesos das conexões denota-se o nome de treinamento da rede neural (TAFNER, 1999).

Denota-se por treinamento de uma rede neural a sua capacidade de adquirir experiência a partir dos casos reais conhecidos, adquirindo, a partir daí, a sistemática necessária para executar adequadamente o processo desejado dos dados fornecidos. Sendo assim, a rede neural é capaz de extrair regras básicas a partir de dados reais (conhecimento implícito), diferindo da computação convencional, onde é necessário um conjunto de regras rígidas pré-fixadas e algoritmos (conhecimento explícito).

A rede aprende sobre um conjunto de regras bem definidas denominada de algoritmo de treinamento. Existem vários tipos de algoritmos de aprendizagem que são usados em

redes neurais artificiais, sendo que, o que diferencia um do outro é a forma com que cada um altera os pesos sinápticos (KOVACS, 1996).

Há dois tipos básicos de treinamento das redes neurais, denominados de aprendizado supervisionado e não supervisionado. No primeiro são apresentados os dados de entrada e saídas desejadas, sendo que a rede atualiza seus pesos sinápticos em seguidas iterações até que os valores convirjam para soluções próximas às saídas esperadas. Ao final de cada iteração a saída da rede é comparada ao valor de treinamento, e a diferença entre eles fornece o erro, que é então retropropagado de forma a ajustar os pesos sinápticos e limiares de acordo com algum algoritmo que minimize esse erro.

Nessa categoria destacam-se as redes “Perceptron” (HAYKIN, 2001), as redes de função de Base Radial (RBF) e as redes “Learning Vector Quantization” (LVQ).

O aprendizado não supervisionado por sua vez, é utilizado em sistemas de classificação e é preciso apenas do conjunto de entradas. A rede classifica os dados por características de entrada e cria automaticamente novas classes ou grupos sempre que um padrão novo é adicionado. Nesta rede, os neurônios são do tipo classificador e os conjuntos de entradas são denominados de elementos para classificação (KOVACS, 1996).

Dentre os algoritmos de treinamento supervisionado destaca-se o algoritmo *backpropagation* (ou Regra Delta Generalizada) que utiliza pares de entradas e saídas desejadas, para ajustar os pesos sinápticos da rede, por meio de um mecanismo de correção de erros. A aprendizagem ocorre em duas fases, denominadas de *forward* e *backward*. (HAYKIN, 2001).

Na fase *forward*, o padrão é apresentado à entrada da rede, e as informações fluem pela rede até alcançar a camada de saída. Durante a fase *forward* não há alteração dos pesos sinápticos que ocorre apenas quando se inicia a *backward*. Nesta etapa, a saída obtida é comparada à saída desejada para esse padrão particular. Se essa não estiver correta, o erro é calculado. O erro é então retropropagado a partir da camada de saída até a camada de entrada, e os pesos das conexões das unidades das camadas internas vão sendo modificados conforme o erro é retropropagado (HAYKIN, 2001). Esse processo é repetido para todos os vetores de entrada da rede até que o erro quadrático médio das saídas alcance um valor aceitável. Por esta característica foi-lhe atribuído o nome de *backpropagation* (HAYKIN,

2001). A derivação do algoritmo “backpropagation”, para redes “Perceptron” com uma única camada escondida é realizada conforme a notação apresentada na Figura 13.

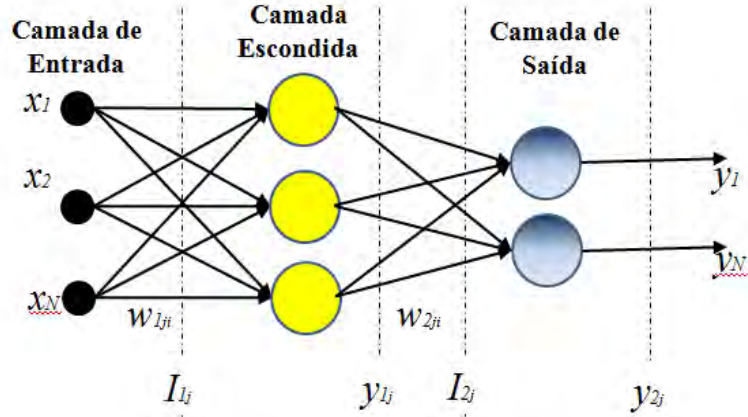


Figura 13. Diagrama esquemático da rede “Perceptron” multicamadas (Adaptado de HAYKIN, 2001)

A partir da Figura 13, adota-se a seguinte convenção:

O parâmetro N especifica o número de variáveis que constitui cada vetor de entrada;

O parâmetro N1 especifica a quantidade de neurônios utilizados na camada neural escondida;

O parâmetro N2 especifica o número de variáveis que constitui cada vetor de saída, e também indica a quantidade de neurônios utilizados na camada neural de saída;

O vetor $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ denota o vetor de entrada da rede;

O vetor $y = [y_1, \dots, y_{N2}]^T$ denota o vetor de saída da rede;

O símbolo $w1_{ji}$ fornece o valor do peso sináptico conectando o j -ésimo neurônio da primeira camada ao i -ésimo neurônio da camada;

O símbolo $I1_j$ fornece o valor correspondente à entrada ponderada do j -ésimo neurônio da camada 1, ou seja:

$$I1_j = \sum_{i=1}^N w1_{ji} x_i; j = 1, \dots, N1 \quad (3)$$

$$I2_j = \sum_{i=1}^{N1} w2_{ji} y1_i; j = 1, \dots, N2 \quad (4)$$

O símbolo y_{lj} fornece o valor correspondente à saída do j -ésimo neurônio da primeira camada (1), ou seja:

$$y1_j = g(I1_j); j = 1, \dots, N2 \quad (5)$$

$$y2_j = g(I2_j); j = 1, \dots, N2 \quad (6)$$

Para determinação dos critérios de parada e desempenho das redes são utilizadas as funções de erro quadrático $E(k)$ e erro quadrático médio E_M . A primeira fornece o valor instantâneo da soma dos erros quadráticos (em relação ao k -ésimo padrão de treinamento) de todos os neurônios da camada de saída da rede, demonstrado pela equação 7:

$$E(k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N2} (d_j(k) - y2_j(k))^2 \quad (7)$$

onde: $d_j(k)$ é o valor da saída desejada no neurônio j em relação à k -ésima entrada.

Já o erro quadrático médio é obtido a partir da soma dos erros quadráticos relativos a todos os padrões de entrada utilizados no conjunto de treinamento da rede, mostrado pela equação 8:

$$E_M = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p E(k) \quad (8)$$

onde: o parâmetro p especifica o número de padrões de treinamento ou a quantidade de vetores de entrada.

Os erros calculados representam o desempenho do aprendizado. A busca por sua minimização representa o sucesso da aplicação da rede. No aprendizado, o processo de ajuste dos pesos é feito através da retropropagação do erro. Para uma rede Perceptron com uma única camada escondida, este processo pode ser dividido em duas fases:

Na primeira etapa é realizado o ajuste dos pesos dos neurônios da camada de saída a partir da minimização da função erro quadrático em relação aos pesos $w2_{ji}$. Utilizando a regra de diferenciação em cadeia, tem-se:

$$\nabla E_{(w2_{ji})} = \frac{\partial E}{\partial w2_{ji}} = \frac{\partial E}{\partial y2_j} \cdot \frac{\partial y2_j}{\partial I2} \quad (9)$$

onde

$$\frac{\partial I_j}{\partial w_{ji}} = x_i \quad (10)$$

$$\frac{\partial y_j}{\partial I_j} = g'(I_j) \quad (11)$$

$$\frac{\partial E}{\partial y_j} = -(d_j - y_j) \quad (12)$$

O símbolo d_j indica a resposta desejada para o neurônio j e $g'(\cdot)$ a derivada da função de ativação associada ao neurônio. A derivada parcial $\partial E / \partial w_{ji}$ representa um “fator de sensibilidade”, determinando a direção de busca no espaço de pesos, para o peso sináptico w_{ji} . Substituindo as expressões (10), (11) e (12) na expressão (9), obtém-se:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = -(d_j - y_j) \cdot g'(I_j) \cdot x_i \quad (13)$$

O ajuste deverá ser feito na direção oposta ao gradiente a fim de minimizar a função erro quadrático, ou seja:

$$\Delta w_{ji} = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} \quad (14)$$

$$\Delta w_{ji} = -\eta \cdot \delta_j \cdot x_i$$

ou ainda:

$$w_{ji}(t+1) = w_{ji}(t) + \eta \cdot \delta_j \cdot x_i \quad (15)$$

onde η é uma constante que determina a taxa de aprendizagem (tamanho do passo em direção ao ponto de mínimo da função erro quadrático) do algoritmo *Backpropagation*, e δ_j denota o gradiente local (o qual aponta para as modificações necessárias nos pesos sinápticos) sendo auto-definido por:

$$\delta_j = (d_j - y_j) \cdot g'(I_j) \quad (16)$$

Após o ajuste dos neurônios da camada de saída, inicia o ajuste dos pesos dos neurônios da camada intermediária (1ª camada neural). Este processo é feito normalmente a partir da função erro quadrático em relação aos pesos w_{lji} . Utilizando a regra de diferenciação em cadeia, tem-se:

$$\nabla E_{(w1_{ji})} = \frac{\partial E}{\partial w1_{ji}} = \frac{\partial E}{\partial y1_j} \cdot \frac{\partial y1_j}{\partial I1_j} \cdot \frac{\partial I1_j}{\partial w1_{ji}} \quad (17)$$

onde:

$$\frac{\partial I1_j}{\partial w1_{ji}} = x_i \quad (18)$$

$$\frac{\partial y1_j}{\partial I1_j} = g'(I1_j) \quad (19)$$

$$\frac{\partial E}{\partial y1_j} = \sum_{k=1}^{N2} \frac{\partial E}{\partial I2_k} \cdot \frac{\partial I2_k}{\partial y1_j} = \sum_{k=1}^{N2} \frac{\partial E}{\partial I2_k} \cdot \frac{\partial (\sum_{k=1}^{N2} w2_{kj} \cdot y1_j)}{\partial y1_j} \quad (20)$$

Inserindo o resultado da multiplicação de (12) por (12) em (20), tem-se:

$$\frac{\partial E}{\partial y1_j} = - \sum_{k=1}^{N2} \delta 2_k \cdot w2_{kj} \quad (21)$$

Substituindo (18), (19) e (21) em (17), tem-se:

$$\frac{\partial E}{\partial w1_j} = (- \sum_{k=1}^{N2} \delta 2_k \cdot w2_{kj}) \cdot g'(I1_j) \cdot x_i \quad (22)$$

Novamente, o ajuste deve ser feito na direção oposta ao gradiente. Dessa forma, a equação (22) torna-se:

$$\Delta w1_{ji} = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial w1_{ji}} \quad (23)$$

$$\Delta w1_{ji} = -\eta \cdot \delta 1_j \cdot x_i$$

ou ainda:

$$w1_{ji}(t+1) = w1_{ji}(t) + \eta \cdot \delta 1_j \cdot x_i \quad (24)$$

onde $\delta 1_j$ denota o gradiente local e é auto-definido por:

$$\delta 1_j = g'(I1_j) \cdot (\sum_{k=1}^{N2} \delta 2_k \cdot w2_{kj}) \quad (25)$$

O processo acima descrito repete-se até que o erro calculado atinja um valor aceitável ou que seja ultrapassado o número máximo de épocas estipuladas para a aplicação desejada.

O algoritmo *backpropagation*, ainda que eficiente, na prática, apresenta certa lentidão em obter a convergência para os valores desejados, o que demanda um elevado esforço computacional. Para minimizar este problema foram propostas inúmeras técnicas que visam acelerar a convergência e a minimização do erro. Dentre elas, destaca-se o algoritmo de Levenberg-Marquardt (HAGAN; MENHAJ, 1994).

Este algoritmo baseia-se no método dos mínimos quadrados para modelos não-lineares e pode ser incorporada ao algoritmo “*backpropagation*” a fim de aumentar a eficiência do processo de treinamento. Nesse algoritmo, as funções erro quadrático e erro quadrático médio fornecidos respectivamente nas equações (7) e (8) podem ser expressas conjuntamente por:

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{1}{2p} \cdot \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^{N2} [d_j(k) - y2_j(k)]^2 \\
 V &= \frac{1}{2p} \sum_{k=1}^p (d(k) - y2(k))^T \cdot (d(k)) \\
 V &= \frac{1}{2p} \sum_{k=1}^p e^T(k) \cdot e(k)
 \end{aligned} \tag{26}$$

onde o termo $e(k) = d(k) - y2(k)$ denota o vetor erro em relação ao k-ésimo padrão de treinamento. Para um padrão k específico o erro é dado pela equação (27):

$$V = \frac{1}{2} e^T(k) \cdot e(k) \tag{27}$$

Dessa forma, enquanto o algoritmo *backpropagation* é um método de descida no gradiente da função erro quadrático, o algoritmo de Levenberg-Marquardt é uma aproximação do Método de Newton (BATTITI, 1992; FORESSE; HAGAN, 1997).

Nesse método a minimização de uma função $V(z)$ em relação a um vetor paramétrico z é dada por:

$$\Delta z = -[\nabla^2 V(z)]^{-1} \cdot \nabla V(z) \tag{28}$$

onde: $\nabla^2 V(z)$ representa a matriz Hessiana e $\nabla V(z)$ a matriz Jacobiana de $V(z)$. Assumindo-se que $V(z)$ é uma função que executa soma de funções quadráticas mostrada na equação 29.

$$V(z) = \sum_{i=1}^N e_i^2(z) \quad (29)$$

Da equação anterior, pode ser mostrado que:

$$\nabla V(z) = J^T(z) \cdot e(z) \quad (30)$$

$$\nabla^2 V(z) = J^T(z) \cdot J(z) + S(z) \quad (31)$$

onde $J(z)$ é a matriz Jacobiana definida por:

$$J(z) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(z)}{\partial z_1} & \frac{\partial e_1(z)}{\partial z_2} & \dots & \frac{\partial e_1(z)}{\partial z_N} \\ \frac{\partial e_2(z)}{\partial z_1} & \frac{\partial e_2(z)}{\partial z_2} & \dots & \frac{\partial e_2(z)}{\partial z_N} \\ \vdots & & & \\ \frac{\partial e_N(z)}{\partial z_1} & \frac{\partial e_N(z)}{\partial z_2} & \dots & \frac{\partial e_N(z)}{\partial z_N} \end{bmatrix} \quad (32)$$

e $S(z)$ é uma função dada por:

$$S(z) = \sum_{i=1}^N e_i(z) \nabla^2 e_i(z) \quad (33)$$

Inserindo-se os resultados de (30) e (31) em (28) obtém-se a equação iterativa do método de Newton, escrita por:

$$\nabla z = [J^T(z) \cdot J(z) + S(z)]^{-1} \cdot J^T(z) \cdot e \quad (34)$$

No algoritmo de Levenberg-Marquardt a equação (34) é modificada da seguinte forma:

$$\nabla z = [J^T(z) \cdot J(z) + \mu I]^{-1} \cdot J^T(z) \cdot e(z) \quad (35)$$

onde I é a matriz identidade e μ é um parâmetro que ajusta a taxa de convergência do algoritmo de Levenberg-Marquardt.

Portanto, a característica principal desse algoritmo é a computação da matriz Jacobiana, que para o processo de treinamento das redes neurais do tipo “*Perceptron*” multicamadas reduz o processamento com o empilhamento de dados, o que torna o algoritmo de

Levenberg-Marquardt de 10 a 100 vezes mais rápido que o algoritmo “*backpropagation*” convencional.

4.6.5. REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS APLICADAS NA MANUFATURA

A motivação por traz da aplicação de redes neurais no reconhecimento de padrões e monitoramento de sistemas de corte de metais vem do fato que um operador de máquinas experiente usa seus sentidos (visão, audição e olfato) para detectar quando a ferramenta esta gastá ou há algo de errado no processo (NOORI-KHAJAVI & KOMANDURI, 1995).

É certo que um operador não pode assegurar, apenas utilizando seus sentidos, a qualidade do processo (rugosidade, circularidade, diâmetro do furo), mas a observação da cor e tamanho do cavaco, presença de fumaça ou incandescência da ferramenta pode auxiliá-lo na detecção de um possível problema. Além desses, os sons e ruídos provenientes do processo também são uma poderosa fonte sensorial que permite a detecção de vibrações ou choques excessivos (NOORI-KHAJAVI & KOMANDURI, 1995).

Em sistemas de monitoramento autônomos, sensores têm o papel de substituir a capacidade sensitiva dos humanos e redes neurais artificiais devem ser capazes de interpretar estes dados e gerar uma ação de controle ou advertência.

O monitoramento de processo de usinagem é ainda um grande desafio à manufatura devido a sua complexidade e elevado número de variáveis. Neste cenário, redes neurais artificiais são uma poderosa ferramenta para detecção de comportamentos não lineares e mutáveis ao longo do tempo.

Vários tipos de redes neurais foram testados e podem ser utilizadas no controle de processos de usinagem, não havendo um modelo que se destaque como a melhor para qualquer aplicação (BARTON & THANGARAJ, 1990).

De acordo com Huang, Chenb e Li (2008), é justificado a modelagem do processo de usinagem com a utilização de redes de multicamadas, de estrutura simples, que têm fácil implementação e menor complexidade computacional se comparada a outros tipos de redes neurais e de sistemas híbridos.

Redes Neurais de Multicamadas com sistemas de atualização de pesos pelo algoritmo de *backpropagation* são simples, robustas e de boa eficiência para sistemas não lineares (BAYLY; LAMAR; CALVERT, 2002), tendo sido utilizadas no modelamento de processos de torneamento, fresamento e furação. A principal vantagem de Redes Neurais Artificiais em relação a outros sistemas computacionais inteligentes é que as RNAs apresentam algoritmos com ferramentas analíticas capazes de reconhecer padrões imersos em complexos ruídos e estimar a correlação entre eles, apresentando alta capacidade de aprendizado, redução de ruído, e capacidade de processamento em paralelo (ABU-MAHFOUZ, 2003). Soma-se a isso o fato de que as redes neurais podem ser facilmente re-treinadas, o que permite sua utilização em sistemas mutáveis ao longo do tempo (SICK, 2002).

De acordo com Aguiar et al. (2008), valores preditos por sistemas de redes neurais têm boa correlação com os valores obtidos em laboratório o que as credencia a aplicações em ambientes industriais.

Apesar de inúmeros trabalhos abordarem o tema do desgaste da ferramenta relatando eficiência nos sistemas propostos a literatura carece de trabalhos que tratem outros resultados do processo, como a rugosidade, diâmetro ou aparecimento de rebarbas nos furos produzidos.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo visa descrever a confecção dos corpos de prova, ferramenta de corte, preparação do banco de ensaios e máquina ferramenta, montagem e ajuste do sistema de aquisição de dados, determinação das condições de usinagem e métodos aplicados aos ensaios e construção das redes neurais.

5.1. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados neste trabalho são compostos por um pacote formado por uma chapa de 2,0 mm de uma liga de Titânio (Ti6Al4V), seguido por uma chapa de 3,0 mm de uma liga de Alumínio (2024T3).

A confecção dos corpos de prova utilizando estas espessuras e materiais foram assim escolhidas por representar com bastante fidelidade condições muito comuns em peças estruturais de aeronave, onde reforçadores de ligas de Titânio ou aço Inoxidável são colocados para aumentar a resistência da fuselagem ou componente de Liga de Alumínio.

A representação do corpo de prova com suas dimensões e posição de usinagem são representados na Figura 14.

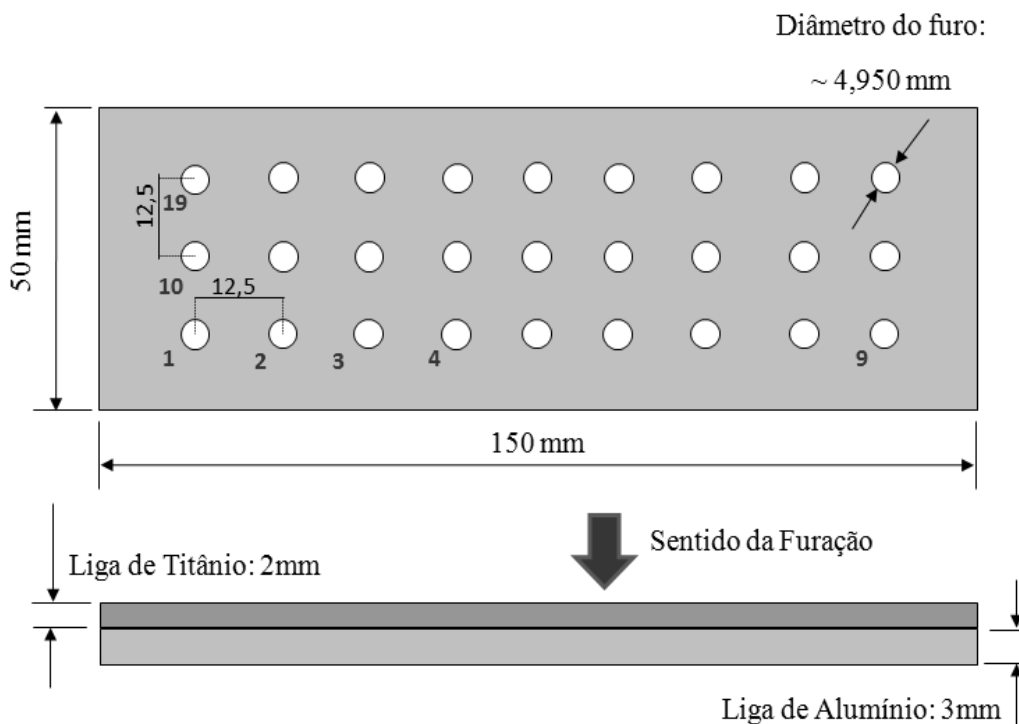


Figura 14. Ilustração dos corpos de prova utilizados nos ensaios.

As principais características físicas, mecânicas e térmicas além dos constituintes de cada material estão listadas na Tabela 3.

Para a realização dos ensaios foram determinadas nove (9) condições de usinagem, sendo três (3) rotações e três (3) velocidades de avanço, combinadas duas a duas. Para cada condição foi planejadas um total de seis (6) corpos de prova, cada um com vinte e sete (27) posições de furação, totalizando cento e sessenta e dois (162) furos por condição.

Assim um total de sessenta (60) corpos de prova foi preparado, sendo que, cinquenta e quatro (54) deles foram separados para utilização nos ensaios definitivos.

Para garantir alta pressão na junção entre as chapas das diferentes ligas, evitando que haja deflexão de apenas uma das chapas ou intrusão de cavaco entre elas, um banco de ensaios foi elaborado com uma tampa de contorno que se sobrepõe às extremidades dos corpos de prova, pressionando uma chapa contra a outra. Além deste dispositivo, uma fita adesiva foi colocada nas extremidades de cada corpo de prova para evitar que depois de retirados do banco de ensaios, as chapas se separassem.

Tabela 3 – Principais propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos materiais utilizados. (Fonte: www.matweb.com)

	Liga de Alumínio 2024T3	Liga de Titânio Ti6Al4V
Propriedades Físicas		
Densidade	2,78 g/cc	4,43 g/cc
Propriedades Mecânicas		
Dureza, Brinell	120	379
Dureza, Rockwell	75 Rockwell B	41 Rockwell C
Tensão de Ruptura	483 MPa	1170 MPa
Tensão de Escoamento	345 MPa	1100 MPa
Alongamento até a ruptura	18,00%	10,00%
Módulo de Elasticidade	73,1 GPa	114 GPa
Coefficiente de Poisson	0,33	0,33
Propriedades Térmicas		
Calor Específico	0,875 J/g-Â°C	0,5263 J/g-Â°C
Condutividade Térmica	121 W/m-K	6,70 W/m-K
Ponto de Fusão	502 - 638 Â°C	1604 - 1660 Â°C
Constituição da Liga		
	Alumínio, Al: 90,7 - 94,7 %	Alumínio, Al: 5,50 - 6,75 %
	Cromo, Cr: <= 0,10 %	Carbono, C: <= 0,08 %
	Cobre, Cu: 3,800 - 4,900 %	Hidrogênio, H: <= 0,015 %
	Ferro, Fe: <= 0,500 %	Ferro, Fe: <= 0,400 %
	Magnésio, Mg: 1,20 - 1,80 %	Nitrogênio, N: <= 0,030 %
	Manganês, Mn: 0,30 - 0,90 %	Oxigênio, O: <= 0,20 %
	Silício, Si: <= 0,50 %	Vanádio, V: 3,50 - 4,50 %
	Titânio, Ti: <= 0,15 %	Titânio, Ti: 87,725 - 91,0 %
	Zinco, Zn: <= 0,25 %	Outros, total: <= 0,30 %
	Outros, total : <= 0,15 %	

Os corpos de prova foram nomeados com um código alfa numérico que determinava a condição de usinagem e numerados de 1 a 6 de acordo com a sua sequência de utilização, sendo que o corpo de prova 1 continha os furos de 1 a 27, o corpos de prova 2 os furos de 28 a 54 e assim por diante. A Figura 15 mostra a formação do código utilizado na identificação dos corpos de prova.

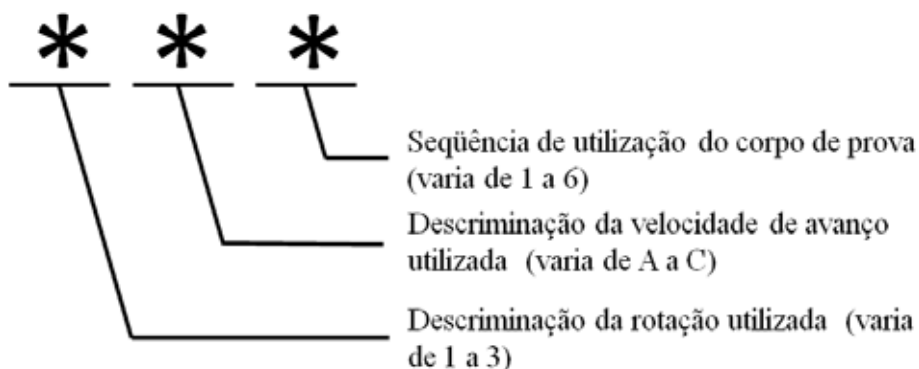


Figura 15. Código de identificação dos corpos de prova.

Assim, por exemplo, o corpo de prova identificado por "2B3", representa que durante seu ensaio foi utilizada a rotação escolhida de número "2", com o avanço "B" e este foi o terceiro corpo de sua prova desta série.

Para auxiliar na velocidade de realização dos ensaios e obter maior padronização entre os corpos de prova, as posições de furação foram determinadas anteriormente aos ensaios. Uma folha impressa contendo a posição de cada furo nos corpos de prova foi colocada sobre a máquina ferramenta, e através do visor da régua graduada desta, os furos foram feitos de forma sempre equidistantes, conforme mostrado na Figura 14 acima.

5.2. FERRAMENTA DE CORTE

Todas as ferramentas utilizadas neste trabalho foram fabricadas pela empresa OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda, especialista na fabricação de ferramentas de geometria especial com linhas especializadas no atendimento às indústrias aeronáuticas do país. As ferramentas foram fabricadas com geometria helicoidais em metal duro e gratuitamente cedidas à realização do trabalho, demonstrando a preocupação da empresa em inovar através do desenvolvimento de seus produtos por incentivo a trabalhos de pesquisa e desenvolvimento.

Para facilitar a identificação das ferramentas e evitar possíveis trocas durante os ensaios, as ferramentas foram identificadas a laser, com numeração seqüencial mostrada na Figura 16.



Figura 16. Broca helicoidal de metal duro da empresa OSG utilizada para realização dos ensaios

Para cada uma das nove (9) condições de usinagem (combinação de uma rotação com uma velocidade de corte) foi utilizada uma ferramenta, totalizando nove (9) ferramentas nos ensaios definitivos, e cento e sessenta e dois (162) furos por broca. Esperava-se com isso, e escolhidas as condições de corte, sendo algumas propositadamente severas para a utilização com a liga de titânio, fazer com que a ferramenta apresentasse desgaste ao final dos ensaios.

Buscou-se assim verificar a relação do desgaste da ferramenta com os sinais medidos, principalmente para determinar sua influência na capacidade do sistema em estimar o diâmetro e a rugosidade dos furos.

Apesar de todas como iguais, sabe-se que os processos de fabricação provocam desvios nas dimensões de peças, mesmo que de mesmo lote. Assim, antes de sua utilização, todas

as ferramentas de corte tiveram seu diâmetro externo medido utilizando um projetor de perfis. A Figura 17 ilustra o processo de medição utilizando este aparelho.

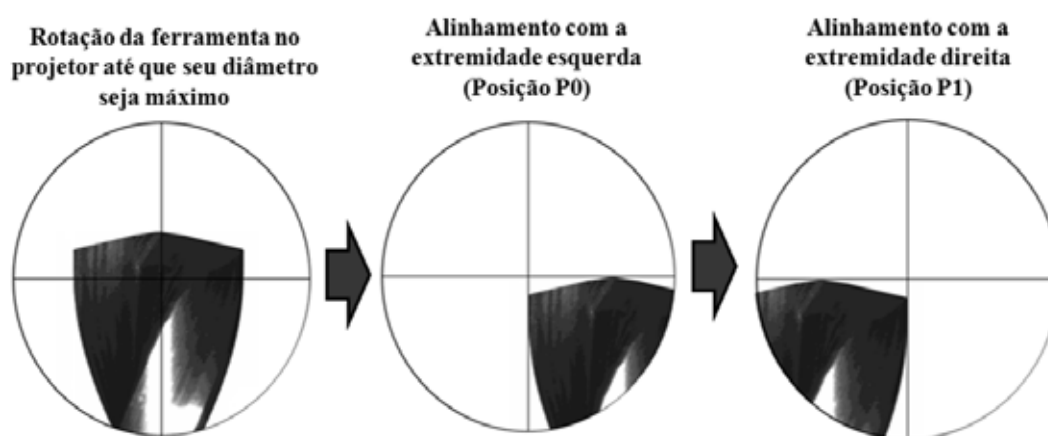


Figura 17. Medição do diâmetro externo das brocas utilizando projetor de perfis

A distância percorrida pela base graduada entre a posição da extremidade esquerda "P0" até a extremidade direita "P1" é o diâmetro considerado da ferramenta. Sabe-se, contudo, que o ajuste da posição de máximo diâmetro não é preciso por isso; para cada ferramenta a operação de medição foi realizada cinco vezes, sendo aceito um valor médio das medidas encontradas.

A Tabela 4 mostra a identificação das ferramentas escolhidas e o diâmetro inicial de cada uma das ferramentas.

Tabela 4– Identificação e diâmetro inicial das brocas escolhidas para os ensaios.

Broca #	Diâmetro [mm]	Diferença [mm]	Condição do ensaio
001	4,939	0,007	1 ^a
004	4,933	0,001	1B
007	4,932	0,000	1C
002	4,934	0,002	2 ^a
005	4,937	0,005	2B
012	4,942	0,010	2C
003	4,938	0,006	3 ^a
008	4,937	0,005	3B
009	4,936	0,004	3C

Para correta comparação entre os resultados de cada condição de usinagem testada, os dados mostrados na Tabela 4 serviram para o cálculo da velocidade de corte, e as diferenças de diâmetro entre as ferramentas foram descontadas dos valores de diâmetro obtidos após o ensaio, tomando por base a ferramenta de número #007, que foi dentre todas as brocas medidas a que apresentou menor diâmetro.

5.3. CONFECÇÃO DO BANCO DE ENSAIOS

Para garantir o correto posicionamento e fixação dos corpos de prova durante os ensaios foi projetado um dispositivo de apoio. Este dispositivo visava garantir a fixação das chapas impedindo que elas se deslocassem durante a realização dos furos, permitindo, contudo, que a ferramenta perfurasse as chapas sem contato com o banco de ensaios.

O dispositivo projetado também precisava garantir que as chapas constituintes do corpo de prova ficassem pressionadas, uma contra a outra, de forma a impedir que durante a furação houvesse intrusão de limalha entre as chapas prejudicando o resultado final do processo.

Finalmente este dispositivo deveria ser projetado respeitando as dimensões do sensor de força, sobre o qual ele seria montado. Uma dimensão superior a do sensor poderia gerar um binário de forças que comprometeria os valores lidos pelo dinamômetro.

A Figura 18 e Figura 19 mostram o desenho em 3 vistas e perspectiva do banco de ensaios fabricado.

Aço com baixo percentual de carbono foi utilizado como matéria prima para fabricação do dispositivo. Porcas borboletas foram colocadas no fechamento da tampa superior para facilitar a troca de corpos de prova entre um ensaio e outro.

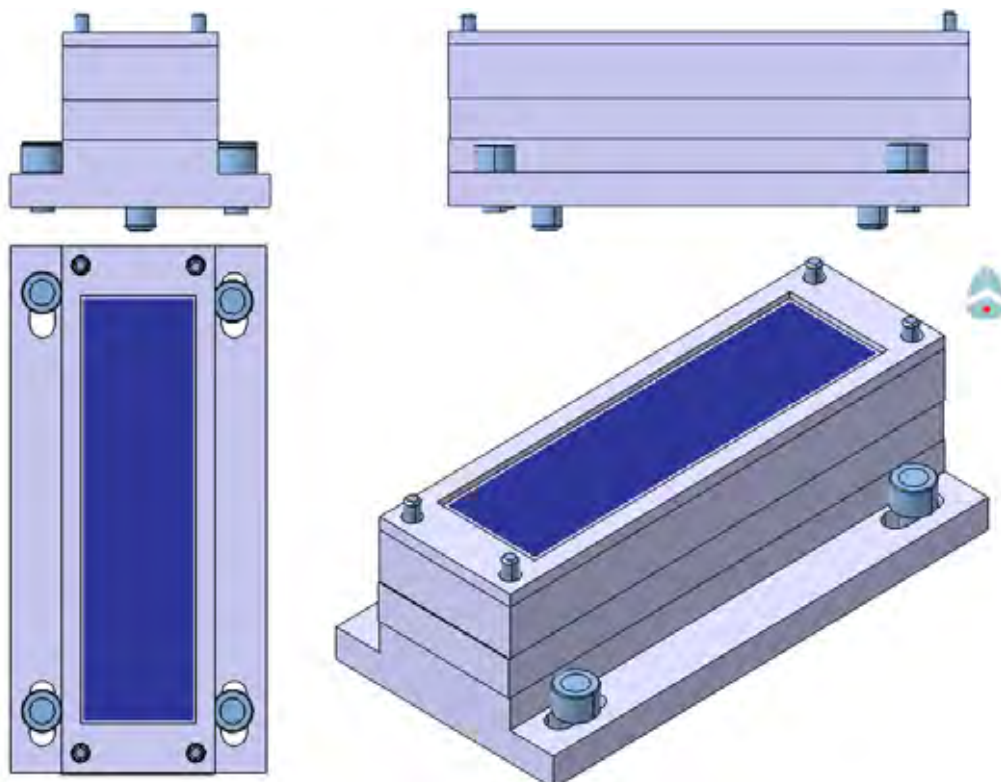


Figura 18. Vistas e perspectiva do banco de ensaios projetado para os ensaios

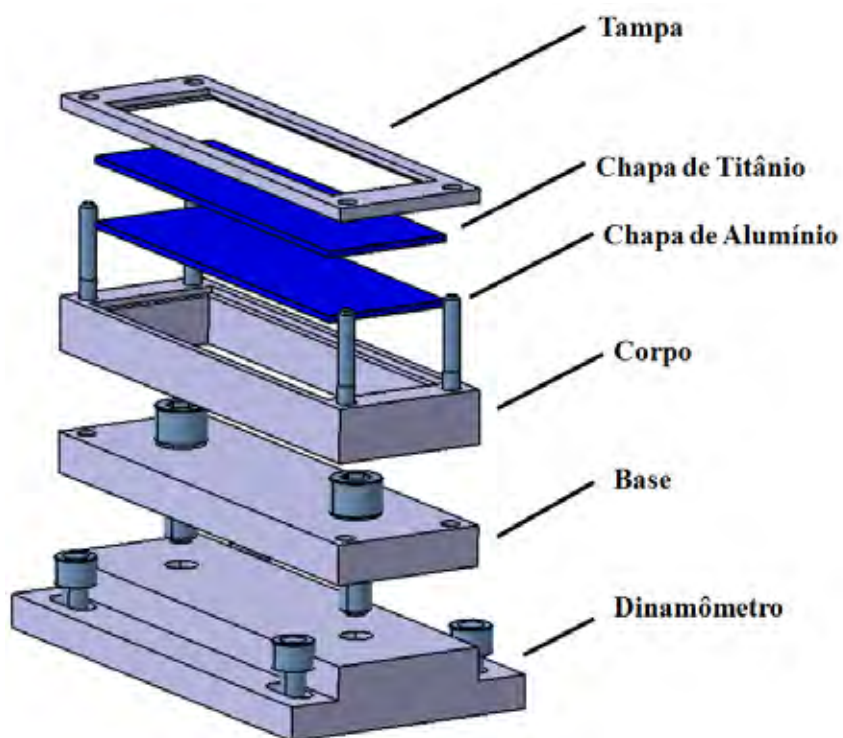


Figura 19. Ilustração do banco de ensaios em vista explodida

5.4. PREPARAÇÃO DA MÁQUINA FERRAMENTA

A máquina ferramenta utilizada neste trabalho trata-se de uma fresadora universal da marca Zocca, modelo U-30, localizada no Laboratório de Tecnologia da Usinagem (LATTUS), no campus da UNESP de Bauru.

Sobre a mesa da máquina ferramenta e utilizando parafusos foi aprisionada a base do sensor de força, e como foi supracitado, sobre ele, foi colocado o dispositivo do banco de ensaios que receberia os corpos de prova.

Nesta máquina ferramenta, o controle da rotação do motor do cabeçote e da velocidade de corte é feito de forma mecânica, alterando as posições das alavancas e mudando as relações entre engrenagens. Assim sendo, as rotações e velocidades possíveis para a utilização nos ensaios limitaram-se às relações existentes na máquina.

Para facilitar o controle de posicionamento, a máquina é equipada com réguas eletrônicas de precisão micrométrica para demarcação das posições dos eixos X, Y e Z ortogonais. Assim, antes do início de cada ensaio, a máquina era posicionada na demarcação de zero garantindo que os furos fossem realizados sempre na mesma posição para os diversos corpos de prova e equidistantes entre si.

Nenhum sistema de lubrificação foi utilizado, mais uma vez, visando reproduzir as condições utilizadas na montagem de aeronaves em industriais aeroespaciais. Nestas indústrias, substâncias denominadas de selantes de interface são colocadas em camadas que variam de 0,1 a 0,4 mm na junção entre chapas. Os selantes de interface têm por objetivo evitar vazamentos de gases durante a pressurização para vôo. Depois de aplicadas, estas substâncias apresentam-se com constituição viscosa por períodos que variam de 20 a 80 horas em média, até sua completa cura. É durante este período de cura que as montagens e processamentos que afetam a região de interface devem ser realizados para evitar o aparecimento de trincas no selante responsável pelas vedações. Durante o período de cura, essas substâncias são facilmente contaminadas perdendo suas propriedades. Os fluidos de corte são contaminantes e por isso seu contato direto com o selante é evitado, justificando assim a condição de corte a seco.

Além disso, como foi visto na seção 4.2.3, há atualmente grande pressão por parte de órgãos ambientais e de saúde e segurança do trabalho, para que as quantidades de fluídos de corte sejam reduzidas em ambientes industriais.

Além da preparação da máquina, os sensores, módulos e computadores utilizados durante os ensaios foram colocados dentro do laboratório em uma posição que facilitasse a operação do computador e da máquina simultaneamente.

Computador e módulos dos sensores utilizados foram colocados em um Gabinete e posicionados ao lado da máquina para reduzir os deslocamentos durante os ensaios. A Figura 20 mostra foto da disposição dos equipamentos preparados para a realização dos ensaios.

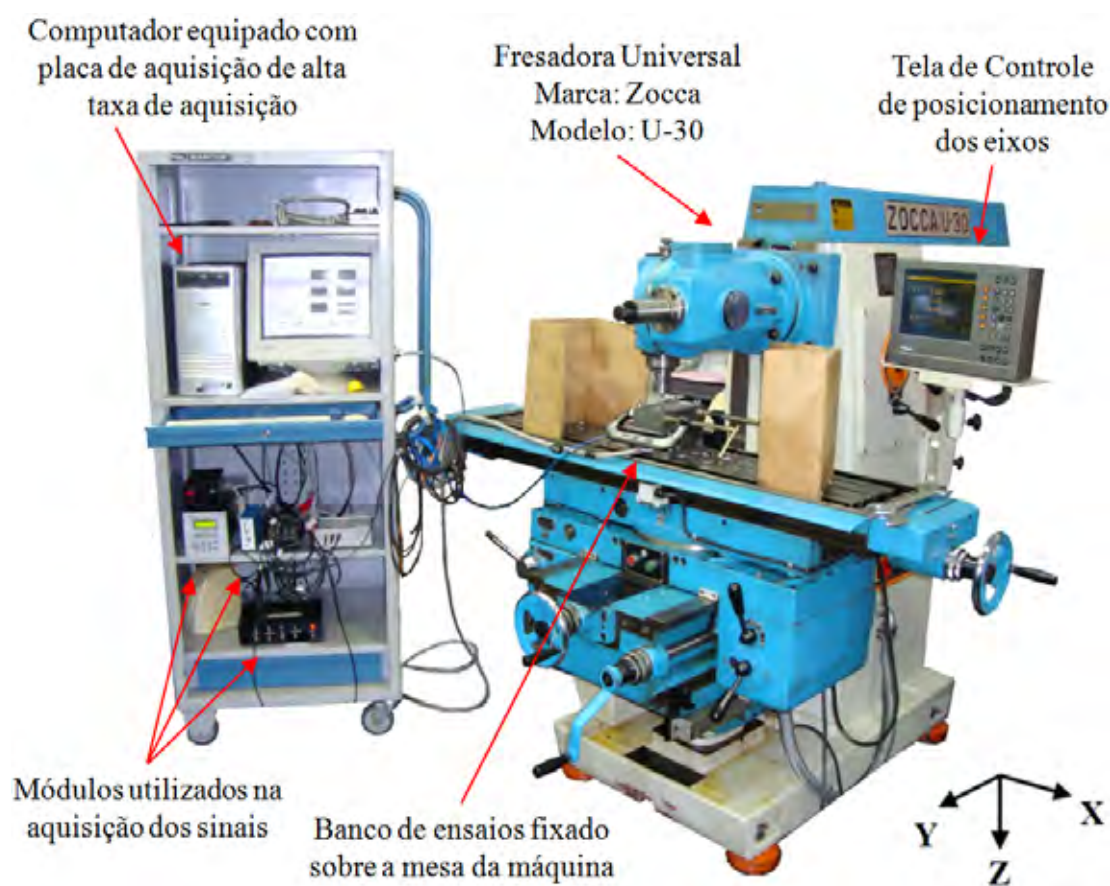


Figura 20. Máquina ferramenta e dispositivos posicionados para a realização dos ensaios.

O computador utilizado foi equipado com uma placa de aquisição de sinais da marca National Instruments, modelo PCI-6035E de 16 bits de resolução que permite a aquisição de sinais em alta frequência, com taxa de aquisição de 2000 de pontos por segundo.

5.5. MONTAGEM, POSICIONAMENTO E AJUSTE DOS SENSORES

Sensores de emissão acústica, acelerômetro unidimensional, sensor de efeito Hall e dinamômetro tridimensional foram utilizados neste trabalho com a finalidade de monitorar respectivamente os sinais de emissão acústica, aceleração, potência do motor elétrico do cabeçote e força tri-axial ortogonal durante o processo de furação.

Estes sinais foram coletados através de sensores instalados na máquina e ligados a um computador, passando por módulos de aquisição de sinais e por um conector de Bórnio, mostrados no esquema da Figura 21.

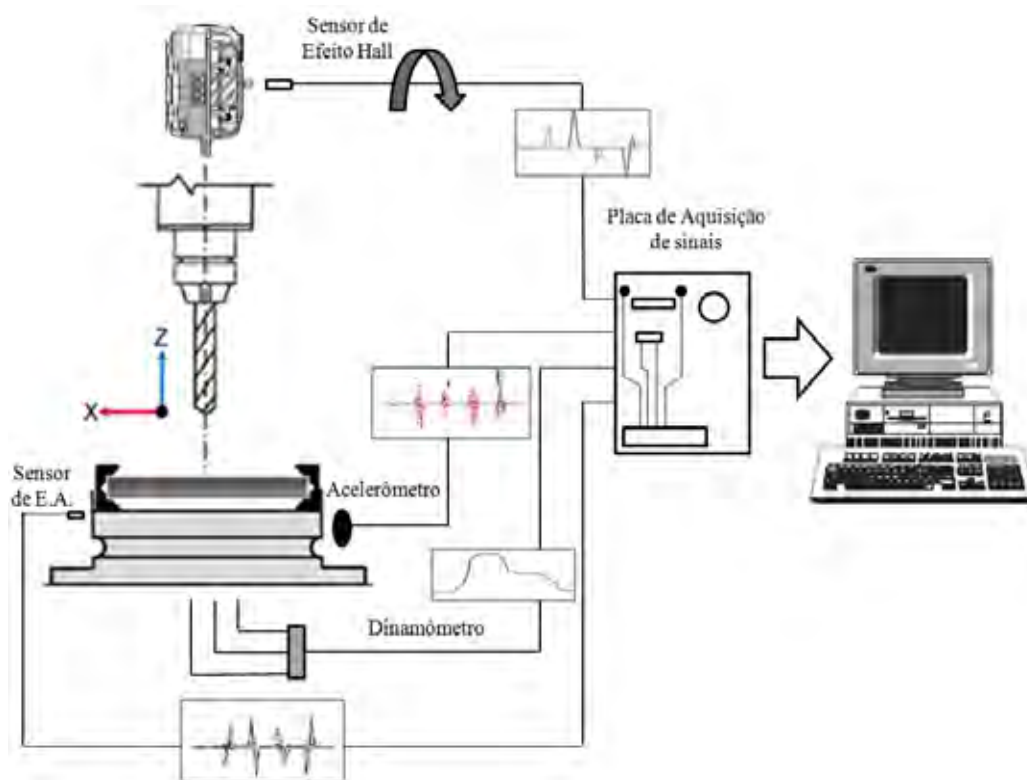


Figura 21. Esquema de montagem dos sensores para realização dos ensaios.

Os tópicos a seguir mostram os equipamentos utilizados e os detalhes de instalação de cada um dos sensores.

5.5.1. SENSOR DE CORRENTE ELÉTRICA TIPO EFEITO HALL

O sistema de medição de potência utilizado neste trabalho foi instalado no painel elétrico da máquina ferramenta, sendo que, sua leitura se fez possível, através da ligação do módulo apropriado à conexão instalada na máquina.

Neste sistema, a corrente elétrica é medida por um sensor de corrente elétrica do tipo efeito Hall, do fabricante Nana Eletronics Co. Ltda, e a tensão também por um sensor de efeito Hall, modelo LV25-P, do fabricante LEM. Para determinação da potência, os sinais são multiplicados por um circuito integrado e posteriormente filtrados, resultando em um sinal elétrico equivalente à potência elétrica consumida pelo motor de indução.

A partir de curvas características do motor de indução, fornecidas pelo fabricante, pode-se determinar, com uma boa precisão, o valor da potência de corte. A equação de calibração para o módulo de potência está descrita abaixo.

$$Pot = 1341,1Pot_m - 7,5 \quad (36)$$

onde:

Pot: é a potência média real;

Pot_m: é o nível DC gerado na saída do módulo.

5.5.2. SENSOR DE FORÇA

O sensor de força tridimensional foi instalado sobre a bancada da máquina e sob o dispositivo projetado para fixação dos corpos de prova, descrito no item 5.3. Na montagem realizada, os eixos do sensor estão alinhados ao sistema de referência mostrados na Figura 20, sendo que o eixo Z é paralelo e de mesmo sentido ao movimento do avanço da ferramenta sobre a peça.

Parafusos foram utilizados para a fixação do sensor à bancada da máquina de forma a impedir qualquer deslocamento durante os ensaios.

O dinamômetro utilizado neste trabalho trata-se de um sensor piezelétrico da marca Kistler, modelo 9257BA, e é acompanhado por um módulo de leitura do sinal da mesma marca. Este módulo do sensor permite o ajuste individual de fundo de escala para o eixo Z, e em conjunto para os eixos X e Y. Assim, durante os ensaios preliminares, os sinais tiveram seus fundos de escala ajustados de forma a possibilitar a leitura de um sinal claro, sem haver saturação. A Tabela 5 mostra os valores empregados.

Tabela 5 – Valores de ganho utilizados no módulo do sensor de força

Eixo	Força Máxima [kN] Fundo de Escala	Taxa de conversão [mV/N]
X	1,0	5,0
Y	1,0	5,0
Z	2,0	2,5

5.5.3.SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA

De acordo com o que foi descrito na seção 4.5, uma das grandes vantagens da utilização de sensores de emissão acústica em detrimento a sensores como os dinamômetros é que na maioria dos casos estes sistemas não são intrusivos ao processo e não alteram a rigidez da máquina ferramenta.

Ao modelar um sistema de monitoramento de um processo em ambiente industrial buscar-se-ia encontrar uma posição para instalação do sensor, de modo que ela não precisasse ser alterada ou removida durante um *set-up* de máquina ou troca de componente.

Pensando neste aspecto e na concepção das máquinas ferramentas existentes, verifica-se que a instalação ótima de um sensor seria, para a grande maioria dos casos, em posição estática próxima ao cabeçote da máquina. Neste local, o sensor não está distante dos pontos de corte, tampouco atrapalha a substituição da peça, ferramental ou ferramenta utilizada.

Pensando nos aspectos abordados, a posição inicial planejada para a instalação do sensor parafusado foi próximo ao mandril da máquina. Contudo, durante a realização dos ensaios preliminares notou-se que, mesmo utilizando o maior ganho permissível deste sensor, o sinal lido era fraco e de baixa qualidade.

Um sensor de E.A. que têm fixação magnética também foi testado em substituição ao modelo inicial, contudo os resultados foram similares. Assim, a posição encontrada para leitura de um sinal de qualidade foi, fixado ao banco de ensaios, projetado para prender os corpos de prova.

A fixação foi feita utilizando grampos. Graxa foi colocada na interface do sensor com banco de ensaios para reduzir os vazios e aumentar a qualidade da leitura dos sinais. O sensor e o módulo utilizado são da marca Sensis, modelo DM42. Os valores ajustados no módulo de emissão acústica estão mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores ajustados para o módulo de E.A.

Módulo de emissão acústica	
Ganho de Entrada	15 db
Ganho de Sinal	50 db
Constante de Tempo	1ms
Redução de Ruído	10 dB
Filtro Passa Alta	2 kHz

5.5.4. ACELERÔMETRO

A mesma discussão realizada sobre a posição do sensor de emissão acústica também se aplica ao acelerômetro utilizado. Inicialmente foi planejada a colocação deste sensor na parte superior da máquina, contudo, o sinal também foi pobre para utilização nesta posição.

A Figura 22 mostra uma foto que ilustra a posição inicialmente pensada para instalação dos sensores e a posição efetivamente utilizada nos ensaios.

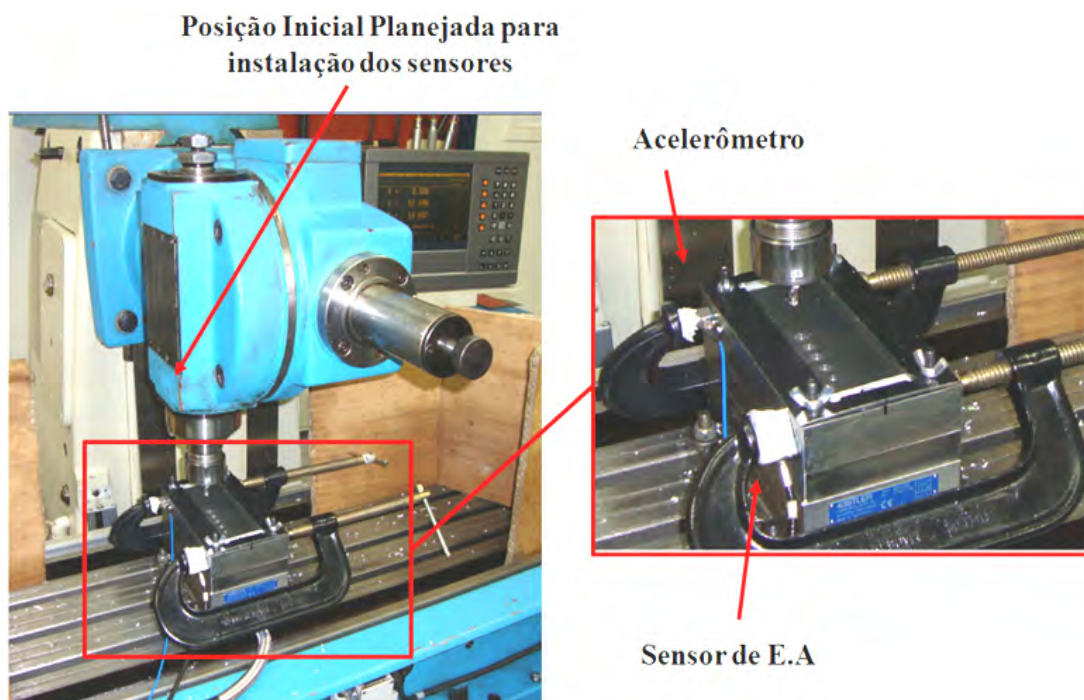


Figura 22. Posição de instalação dos sensores de E.A. e acelerômetro

O sensor de aceleração utilizado é da marca PCB, modelo 482811. Para a realização dos ensaios, o módulo do sensor de aceleração foi ajustado para fundo de escala de sinal de 100 vezes.

5.5.5. LIGAÇÃO DOS SENSORES À PLACA DE AQUISIÇÃO

A ligação dos sensores a placa de aquisição de deu através de um conector de Borne da marca National Instruments, modelo BNC 2110. A Tabela 7 mostra os canais de leitura utilizados para cada um dos sinais.

Tabela 7 – Especificação dos canais utilizados para leitura dos sensores

Sensor Identificação	Grandeza Medida	Canal de Medição
Acelerômetro	Aceleração, vibração	Canal 0
E.A.	Emissão acústica	Canal 1
Efeito Hall	Potência do motor elétrico	Canal 2
Dinamômetro	Força (eixo X)	Canal 3
	Força (eixo Y)	Canal 4
	Força (eixo Z)	Canal 5

5.6. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Antecedendo a realização dos ensaios definitivos, foram realizados testes preliminares que tinham por objetivo principal o ajuste da posição de montagem dos sensores, o acerto dos valores de fundo de escala e a determinação das condições de corte.

Para coleta e armazenamento dos dados foi utilizado um programa construído em plataforma LabVIEW. O programa foi desenvolvido pelo aluno de Iniciação Científica Hildo Guillard e adaptado pelo autor desta pesquisa para utilização neste trabalho.

Neste programa, ao pressionar o botão "*RUN*" os sinais vindos dos sensores começavam a ser gravados em formato binário. A escolha deste formato foi feita para reduzir o tamanho dos arquivos e facilitar sua posterior análise.

O local de gravação e o nome do arquivo eram determinados na tela de operação. Para facilitar o pós-processamento dos dados de forma automática, através de rotinas computacionais, o nome dos arquivos levava a condição de usinagem do ensaio, demonstrado pelo código apresentado na Tabela 4, acrescido de um número sequencial de 1 a 162 que representava o furo realizado em cada condição.

A tela de interface do programa de aquisição utilizado está mostrada na Figura 23. As seis telas de gráfico deste programa mostravam o comportamento dos sinais durante o ensaio possibilitando detectar de forma rápida uma possível interferência ou erro.

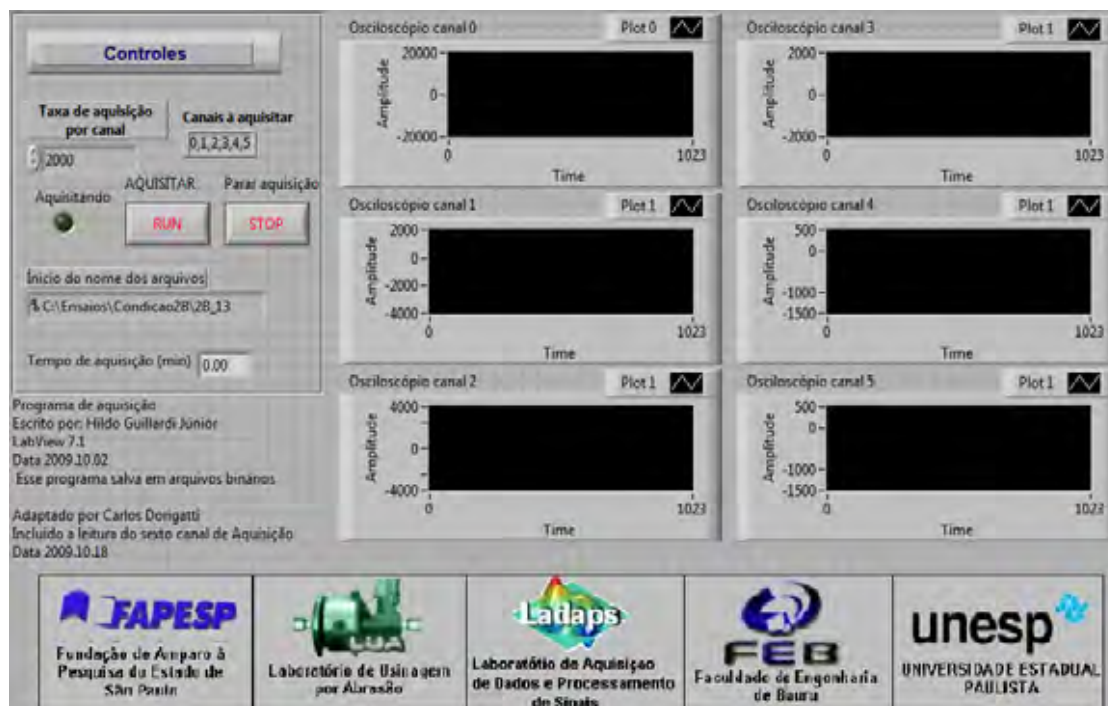


Figura 23. Interface LabVIEW do programa desenvolvido para a coleta e armazenamento de dados

Com os sensores posicionados e o programa em funcionamento, alguns furos foram realizados para verificar a leitura dos sensores. Como foi descrito anteriormente, as posições inicialmente pensadas para posicionamento dos sensores de aceleração e emissão acústica apresentaram sinais pobres e necessitaram alterações.

Com os sensores em suas novas posições, iniciou-se um trabalho de ajuste dos módulos. Este ajuste visou possibilitar a leitura dos sinais na condição de usinagem mais branda, onde o corte era favorecido por um baixo avanço, e ao mesmo tempo, fazer a leitura na condição mais severa, sem que houvesse saturação dos sinais, fazendo com que dados importantes do processo não fossem perdidos.

A Figura 24 mostra o caso de um ajuste onde o sinal de emissão acústica apresentava elevado nível de ruído, mostrado pela grande variação do sinal durante o período de inatividade antes do início do corte e com pontos de saturação, demonstrado pelo corte reto dos picos do sinal.

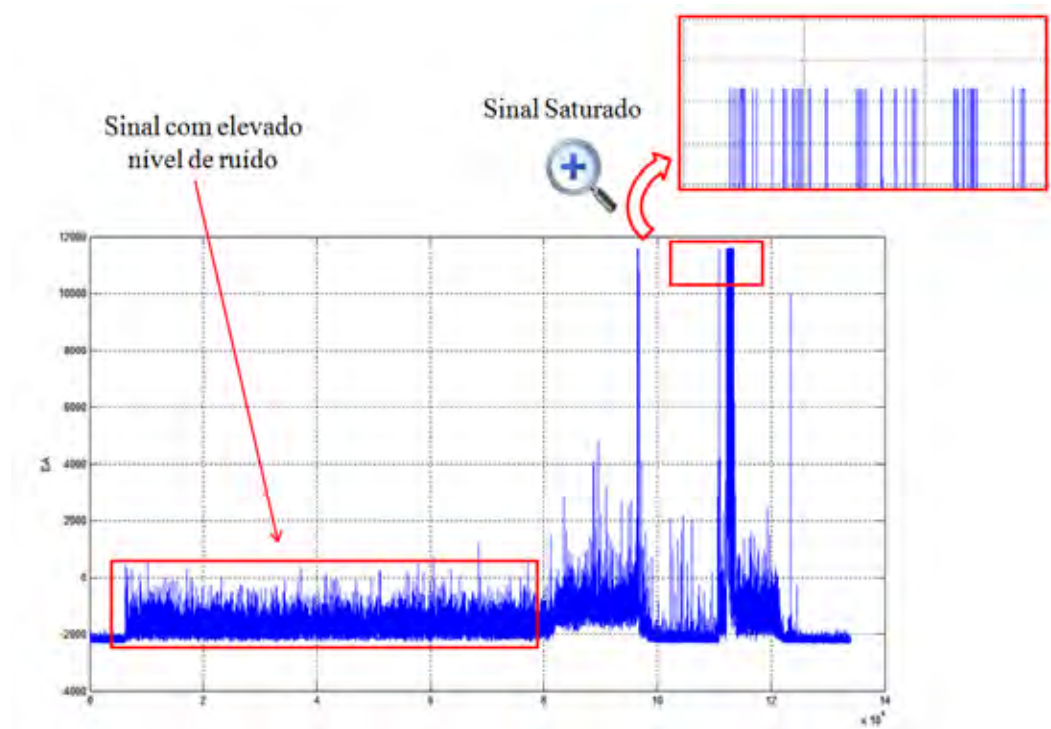


Figura 24. Sinal de emissão acústica apresentando elevado nível de ruído e regiões de saturação

Depois de determinadas os ajustes dos valores de ganho e redução de ruídos satisfatórios aos ensaios deu-se a escolha das condições de usinagem para utilização nos ensaios definitivos.

A Tabela 8 mostra os parâmetros de corte (rotação e velocidade de avanço) definidos para a utilização nos ensaios, a velocidade de corte e o avanço calculado a partir deles.

Tabela 8 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios

Condição de Usinagem	Código de Identificação	Rotação [rpm]	Velocidade de Avanço [mm/min]	Velocidade de Corte (m/min)	Avanço [mm/rev]
1	1A	1000	90,0	15,52	0,090
2	1B	1000	22,4	15,50	0,022
3	1C	1000	250	15,49	0,250
4	2A	500	90,0	7,75	0,180
5	2B	500	22,4	7,75	0,045
6	2C	500	250	7,76	0,500
7	3A	2000	90,0	31,03	0,045
8	3B	2000	22,4	31,02	0,011
9	3C	2000	250	31,01	0,125

A escolha destes parâmetros visou reproduzir algumas condições de usinagem usualmente utilizadas na indústria para processamento de ligas de titânio e outras condições de usinagem bastante severas ou brandas, como é o exemplo dos ensaios 2C e 3B, respectivamente, onde as taxa de material removido por revolução da ferramenta é ora muito elevada, causando desgaste excessivo da ferramenta; ora muito branda, gerando cavacos finos e não quebradiços.

Para a realização dos ensaios, o cabeçote da máquina era posicionado a uma altura padrão, o programa de aquisição era iniciado e então a alavanca que controla o avanço era acionada. Quando o cabeçote atingia o fim do curso de avanço a alavanca da máquina era invertida para retrocesso da ferramenta e ao atingir novamente a posição superior o programa de aquisição era desligado, causando assim um tempo de inatividade dos sinais, anterior ao toque da broca no corpo de prova e posterior a sua saída.

5.7. TRATAMENTO E ANÁLISE DOS SINAIS COLETADOS

Os sinais coletados durante os ensaios foram analisados com o auxílio de rotinas desenvolvidas no MATLAB. Devido à sistemática utilizada durante os ensaios, os dados coletados pelos sensores apresentam dois períodos de inatividade.

O primeiro período está relacionado ao tempo transcorrido entre o acionamento do programa de aquisição de dados até o toque da ferramenta no corpo de prova, e o segundo período, corresponde ao tempo entre a saída da ferramenta da peça até o desligamento do sistema de aquisição. Estes períodos de inatividade podem ser visualizados na Figura 25.

Dos sinais coletados, a força no eixo Z é a que mais facilmente permite determinar o exato momento de início e fim do corte, bem como o momento de transição da ferramenta entre os materiais. Baseado nesta característica, este sinal foi escolhido e utilizado dentro de um algoritmo, que detectava automaticamente, através da construção de médias móveis, o ponto inicial e final da usinagem. A Figura 25 mostra o sinal de força em Z e os pontos iniciais e finais do corte.

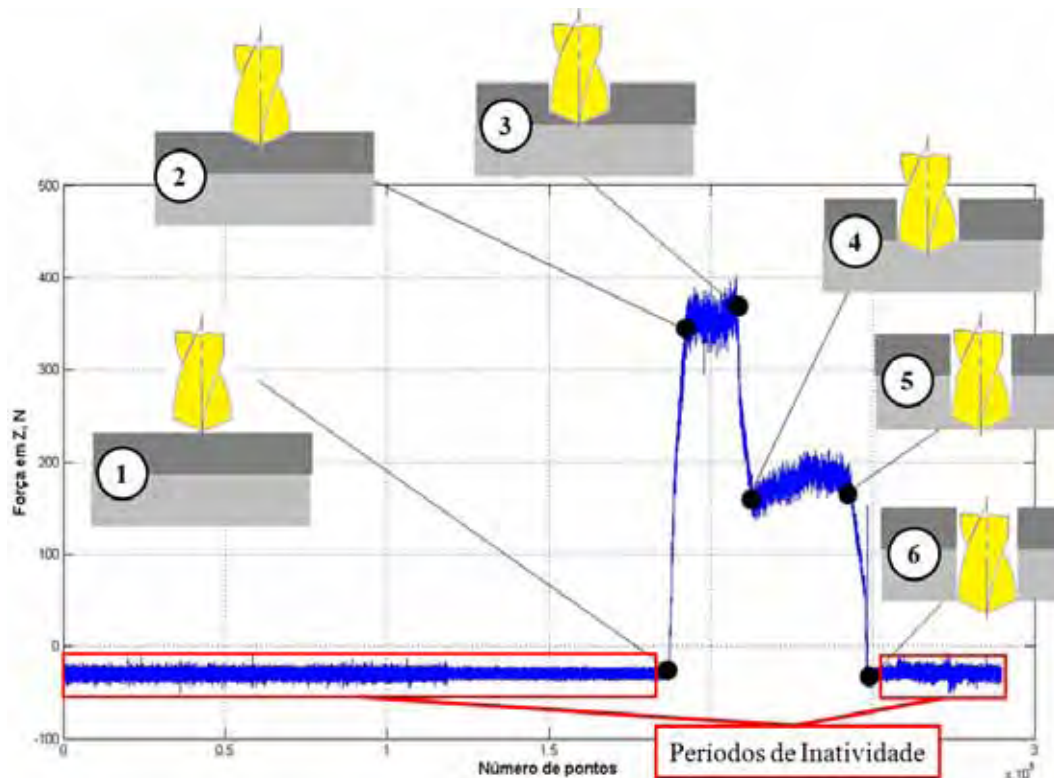


Figura 25. Característica do sinal de força em Z utilizado para determinação do ponto inicial "1" e final "6" do corte

Pela análise da Figura 25 é possível detectar seis pontos distintos e correlacioná-los com o processo, sendo:

- Ponto 1: Ponta da ferramenta de corte toca o corpo de prova de titânio, iniciando o processo de usinagem. Há um rápido crescimento no valor da força lida.
- Ponto 2: Aresta principal de corte atinge a liga de titânio dando início a geração do furo no diâmetro total. Fato pode ser notado pela estabilização do sinal por um período de tempo até atingir o ponto três.
- Ponto 3: Ponta da broca toca a liga de Alumínio. Por se tratar de um material mais mole inicia-se um decréscimo no valor da força no eixo Z.
- Ponto 4: Aresta principal de corte atinge a liga de Alumínio, fato demonstrado pelo início de uma nova região quase horizontal.
- Ponto 5: Ponta ferramenta começa a deixar o corpo de prova. Começa o retorno do sinal à seu patamar inicial.
- Ponto 6: Aresta principal de corte ultrapassa totalmente as chapas, fazendo com que o sinal retorne a um ponto de inatividade do processo.

A correlação entre os pontos nos diferentes sinais pode ser observada na Figura 26. Nesta figura fica mais simples correlacioná-los com o avanço do processo no tempo, e nota-se que há uma maior dificuldade em detectar claramente o início e fim do processo senão pelo sinal da força no eixo Z.

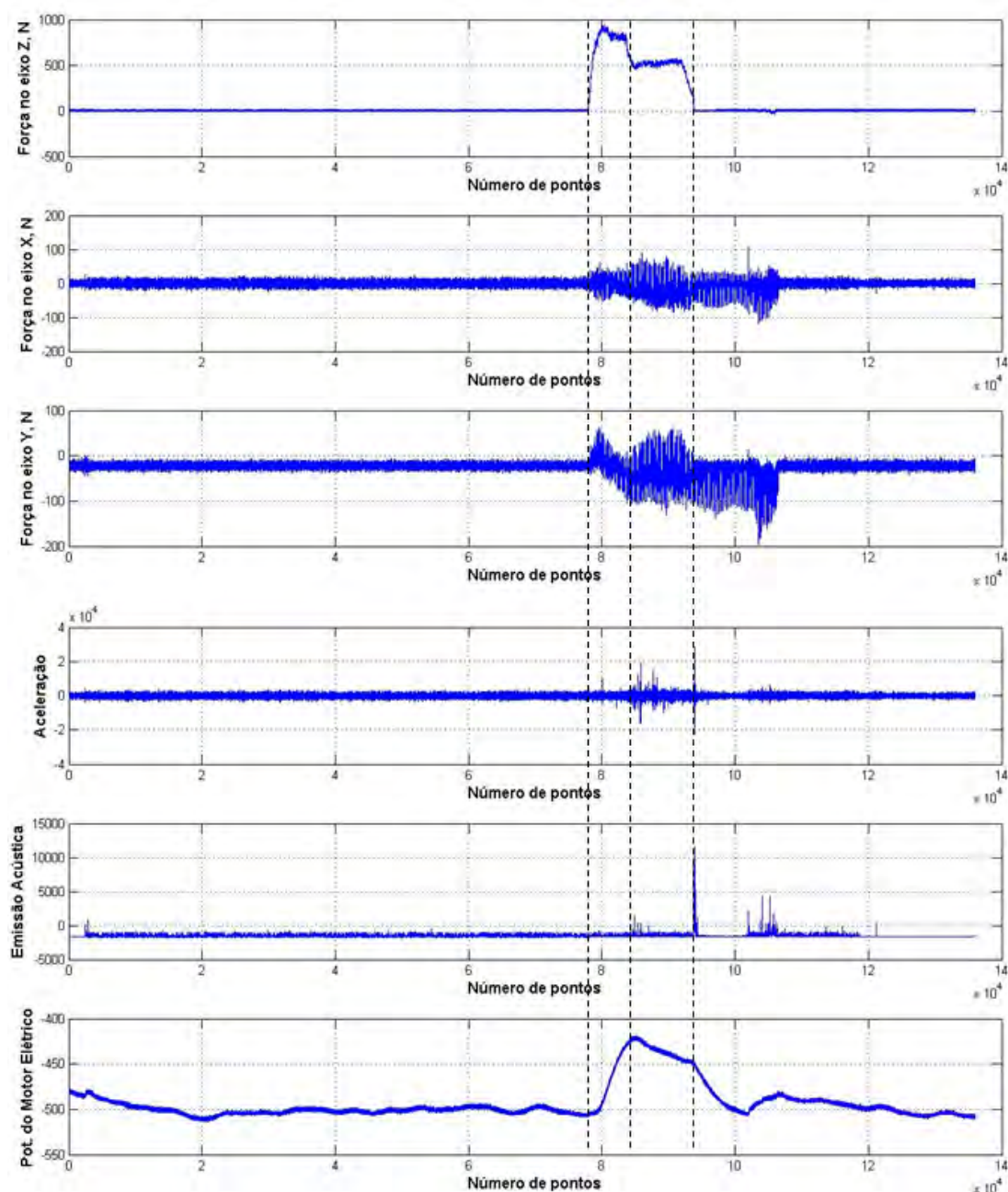


Figura 26. Correlação entre o processo e os sinais dos sensores

A Figura 26 mostra que a região tida como de inativa para a força em Z, representada depois do ponto 6 na Figura 25, apresenta marcas de sinal para todas as outras grandezas

medidas. Isso se deve ao fato que mesmo depois da aresta principal da ferramenta ultrapassar totalmente as chapas do corpo de prova, ainda existe contato lateral da broca com a parede do furo.

Como foi descrito na revisão literária, os processos de usinagem envolvem deformações plásticas e deformações elásticas do material. A deformação plástica está relacionada ao processo de corte e à geração de tensões de cisalhamento que ao atingirem determinado valor provocam a ruptura do material, ocasionando a fragmentação do cavaco.

As deformações elásticas, por sua vez, se devem ao recalque do material usinado, provocado pela compressão exercida pela ferramenta na parede do furo. Quando esta compressão deixa de existir, ou seja, quando as arestas de corte ultrapassam totalmente a chapa, a região da porção final do material retorna da deformação plástica, ocasionando o contato da ferramenta com a parede do furo.

Este fenômeno é denominado de "*spring back*" e ocorre durante todo o avanço da ferramenta na porção exatamente acima das regiões das arestas principais de corte. Sua influência é, contudo, mais facilmente percebida, na porção final da geração do furo, uma vez que nesta região a guia da ferramenta já deixou a peça e não existe mais o apoio das regiões frontais da broca que se contrapunham a força exercida pelo contato do material que retorna da deformação plástica.

Este contato fica ainda mais evidente durante o retorno do cabeçote da máquina, quando é possível escutar ruídos decorrentes da fricção da broca contra a parede do furo e mesmo detectar cavacos de tamanhos bem reduzidos gerados pelo corte da broca durante este retorno.

Como a máquina utilizada nos ensaios deste trabalho não é CNC, o tempo transcorrido entre o final do corte e o retorno do cabeçote variou de um ensaio para outro, uma vez que dependia da percepção do operador do ensaio em notar que a ferramenta havia atingido o final de seu curso e reverter o movimento de avanço através de uma alavanca.

Por apresentar variações entre um ensaio e outro, os dados coletados depois do ponto seis (6) da Figura 25 foram descartados das análises como será mostrado a seguir.

Pelo que foi apresentado, é possível afirmar que este contato da ferramenta com a parede do furo e o corte ocorrido durante o recuo da ferramenta afetam o diâmetro e a

rugosidade dos furos produzidos, uma vez que há remoção de material e fricção da lateral da broca com a parede do furo, contudo, não se pode dizer se esta influência é relevante ou não para os níveis que precisão do processo estudado e equipamentos utilizados neste trabalho. Assim, recomenda-se para o futuro que estas relações sejam mais detalhadamente estudadas, de preferência, utilizando máquina automática que permitam padronização na operação.

Depois de excluídas as regiões tidas como inativas mostradas na Figura 25 construiu-se a base de dados para as discussões mostradas neste trabalho e a alimentação das redes neurais artificiais. A região remanescente do gráfico foi dividida em duas partes, sendo cada uma referente a um material. Os dois quintos ($\frac{2}{5}$) iniciais do gráfico são referentes à usinagem da liga de titânio e os outros três quintos ($\frac{3}{5}$) ligados ao material 2024T3, conforme mostrado na Figura 27.

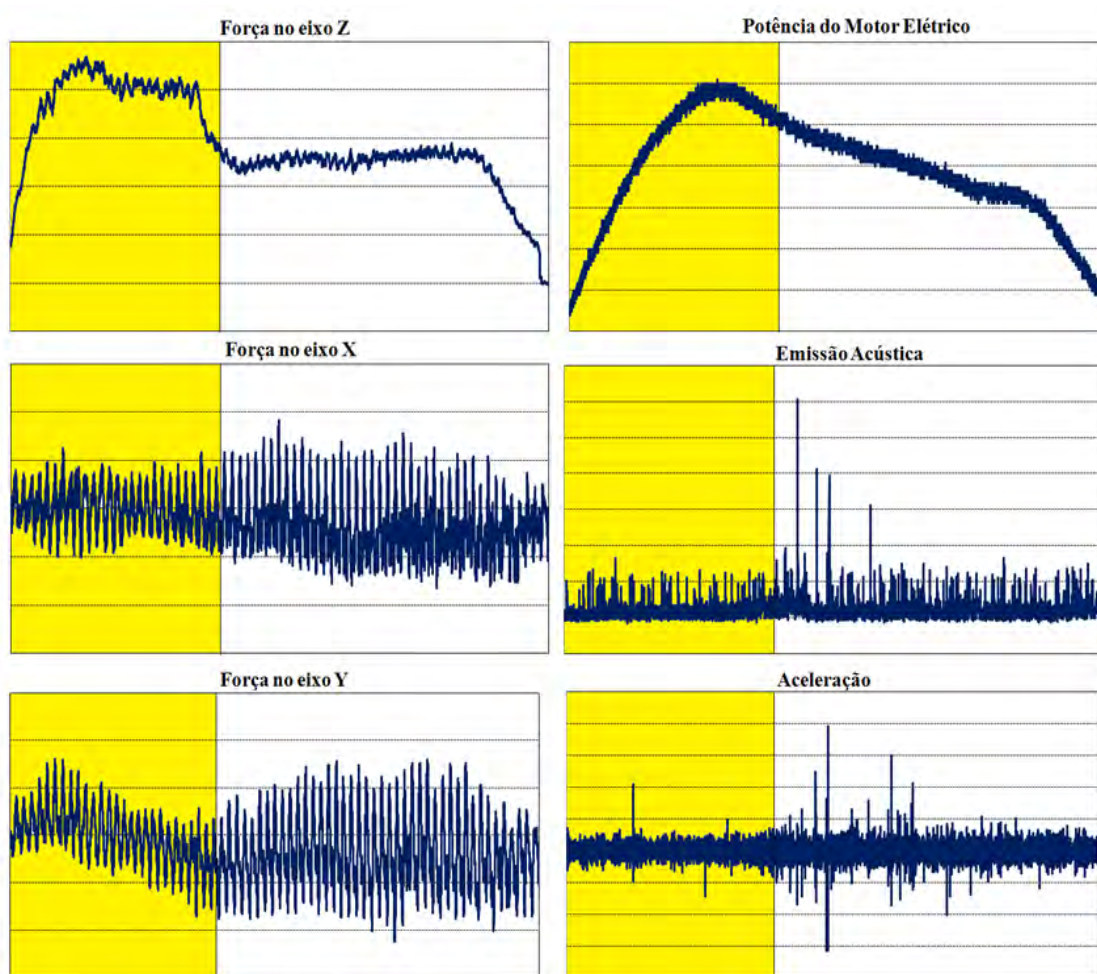


Figura 27. Divisão dos sinais referente à região de usinagem de cada um dos materiais

Esta divisão se deve a espessura desigual das chapas. Sabendo que a velocidade de avanço no ensaio é constante e que a chapa de alumínio é cinquenta por cento mais espessa que a chapa da liga de titânio, resulta a divisão apresentada.

A importância de dividir os sinais em duas regiões é ter valores separados de cada material para alimentação da rede, pois conforme será descrito, cada liga terá seu valor de diâmetro e rugosidade associado para um mesmo furo.

Feita a divisão, foi calculada a média aritmética dos valores absolutos de cada sinal. Estes resultados foram utilizados nas discussões acerca dos resultados da usinagem e serviram como entrada para as redes neurais artificiais.

5.8. MEDIÇÃO DO DIÂMETRO DOS FUROS

Depois de realizado os ensaios os corpos de prova foram limpos, utilizando ar comprimido e panos para eliminar os cavacos e sujeiras que pudessem existir.

Para realizar a medição do diâmetro dos furos foi utilizado um relógio comparador de precisão micrométrica da marca Mahr, modelo Marcator 1087B, equipado com uma haste com ogivas em sua ponta. Este equipamento permite a medição do diâmetro através da inserção da haste no interior do furo.

Quando a haste é introduzida, as esferas presentes em sua ponta se fecham, empurrando a agulha interna do aparelho para cima, o que resulta na medição por parte do relógio comparador, com uma precisão de $\pm 0,005$ mm conforme informação do fabricante. A Figura 28 trás um esquema representativo do funcionamento do aparelho.

Como os materiais são diferentes, o diâmetro do furo produzido pelo processo de furação também é geralmente diferente. Isso pode ser explicado pelas diferenças de dureza e resistência a abrasão de cada material, pela formação de arestas postiças e pela deflexão da ferramenta entre outros.

Assim, cada furo teve seu diâmetro medido em duas regiões: Na entrada do furo, referente ao diâmetro da liga de titânio e na saída do furo, referente à liga de alumínio, conforme mostra Figura 28.

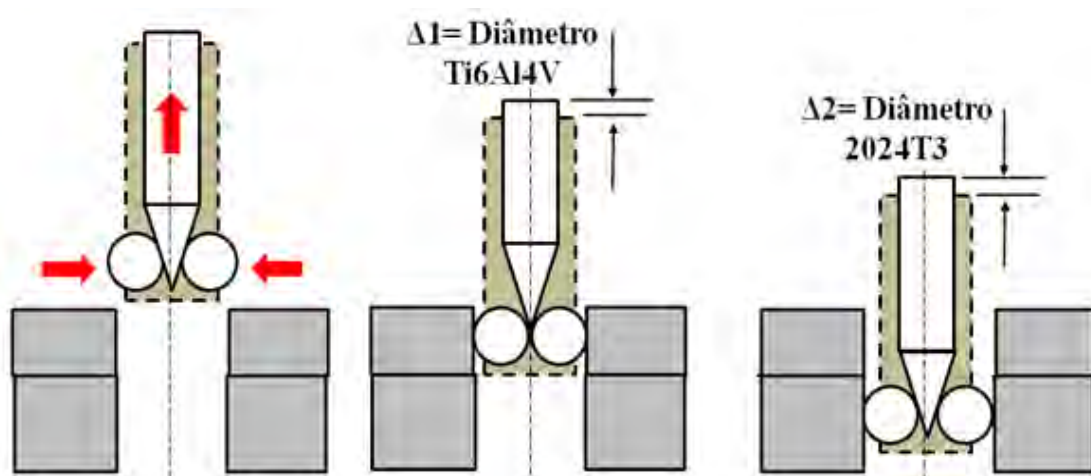


Figura 28. Esquema representativo do funcionamento do aparelho utilizado na medição da rugosidade

Além das diferenças dos furos em cada material, sabe-se que, conforme descrito na seção 4.4, nenhum furo é perfeitamente circular, apresentando sempre uma geometria oval. Desta forma, o diâmetro máximo e mínimo de cada furo, em cada material, também foi medido (Figura 29).

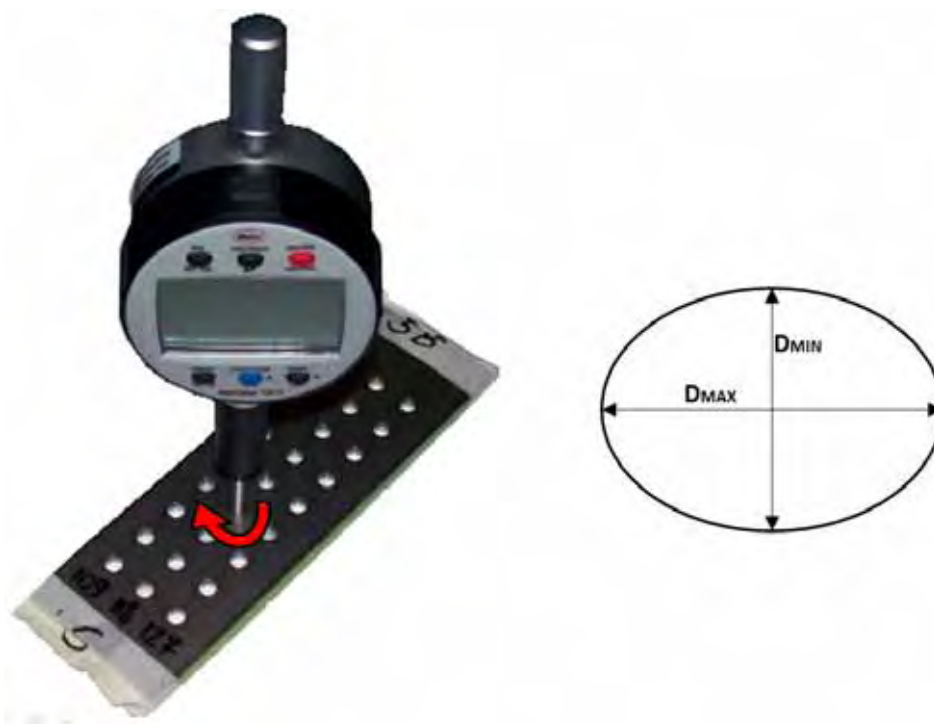


Figura 29. Processo de medição do diâmetro máximo e mínimo dos furos

A determinação desta diferença entre diâmetros de um mesmo furo foi possível através da utilização da função *min/max* do relógio comparador. Com a haste introduzida no furo, a função "máximo" do relógio comparador era acionada. Com o equipamento nesta posição era dado um giro de trezentos e sessenta graus (360°) na haste, no interior do furo, sendo que, ao fim do giro, o relógio mostrava em seu *display* o valor do máximo diâmetro. O processo era repetido para o menor valor.

Da forma descrita, ao final das medições, cada furo apresentava quatro medidas de diâmetro vinculadas, sendo: máximo diâmetro na liga Ti6Al4V, mínimo diâmetro na liga Ti6Al4V, máximo diâmetro na liga 2024T3 e mínimo diâmetro na liga 2024T3. Estes valores foram utilizados no treinamento, validação e teste das redes.

5.9. MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

A medição da rugosidade da parede interna dos furos deste trabalho foi realizada no Laboratório de Metrologia da empresa Taylor Robson, localizada na sede nacional da empresa, na cidade de São Paulo.

Para a realização do trabalho foi utilizada uma máquina da Marca Taylor Robson, modelo Form Talysurf - Intra 50. A maior dificuldade encontrada em realizar esta medição está no pequeno diâmetro do furo, que impede a utilização de rugosímetros convencionais, uma vez que a haste com ponta de diamante destes equipamentos não é pequena suficiente para percorrer o interior do furo. Assim, o equipamento utilizado foi equipado com uma haste especial, denominada de *Small Bore*, especial para medição de furos de pequeno calibre.

Como a medição dos furos é bastante trabalhosa e demorada, para cada corpo de prova de vinte e sete (27) furos, foram escolhidos três (3) furos de amostra, sendo eles os primeiros furos de cada fileira do corpo de prova.

A rugosidade média aritmética (*Ra*) foi utilizada para as comparações e análises deste trabalho. A Figura 30 mostra a máquina e processo de medição e enfatiza os furos medidos de cada amostra.

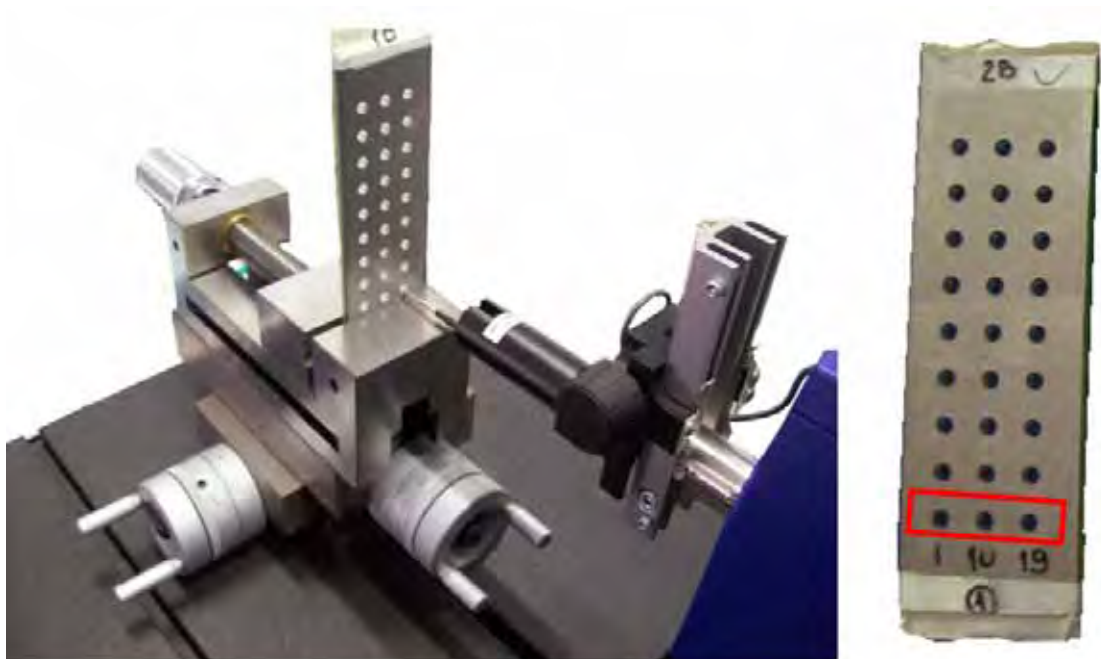


Figura 30. Medição da rugosidade e demonstração dos furos escolhidos como amostra de cada corpo de prova

O valor de *cut-off* adotado para a medição da rugosidade foi de 0,8 mm, valor este sugerido pela norma ISO 4288-1996 para medição de superfícies com R_a entre 0,1 μm e 2 μm . Os comprimentos de amostragem adotados foram de 3,4 mm para a Liga de alumínio, e 1,6 mm para o Titânio, uma vez que a espessura da chapa (2,0 mm) não permitia adoção de comprimento de amostragem maior.

Da mesma forma que ocorre para o diâmetro do furo, a rugosidade também varia de um material para outro. Assim, para cada ponto escolhido de análise, foi medida separadamente a rugosidade na parede interna do furo de ambas as ligas.

Os furos não medidos de cada corpo de prova tiveram sua rugosidade estimada através de uma regressão linear entre os valores de um furo e outro fornecendo assim quantidade de dados suficiente para treinamento das redes.

5.10. CONSTRUÇÃO DAS REDES NEURAIIS

Todas as redes construídas neste trabalho foram feitas com a utilização do software MATLAB e seu *ToolBox* específico para esta aplicação. Uma rede *Feedforward* com realimentação *BackPropagation* foi utilizada. Para determinação do número de camadas escondidas, número de neurônio em cada camada, momento e taxa de aprendizado da rede foi desenvolvido um algoritmo que variava estes valores automaticamente a partir dos dados colocados em uma tabela.

Foram testadas redes com uma, duas e três camadas escondidas, e neurônios nestas camadas que variavam de 5 a 40 neurônios num total de cento e cinquenta e cinco (155) combinações. Além dos neurônios e camadas, a taxa de aprendizagem foi testada em valores de 0,05, 0,20, 0,30, 0,50 e 0,90; e o momento em valores que variavam de 0,1 a 0,9 com incrementos de 0,1.

Este processo resultou na construção de redes distintas aplicadas à estimação do diâmetro e da rugosidade, mostrados nos subitens abaixo. Ao total, estas combinações resultaram em mais de seis mil combinações de redes testadas para cada aplicação, sendo que ao final do treinamento e validação de cada uma dessas arquiteturas de rede, os erros eram calculados, sendo dados pelo valor medido subtraído do valor fornecido pela rede para aquela posição, sendo este diâmetro ou rugosidade.

Para utilização no treinamento, validação e teste das redes neurais artificiais, os dados coletados durante os ensaios foram aleatoriamente divididos, através da função *dividerand* do MATLAB, que separa aleatoriamente os valores tendo sido escolhidos sessenta por cento (60%) dos valores para treinamento, vinte por cento (20%) para validação e os vinte por cento (20%) restantes para teste e verificação da eficácia do método proposto.

5.10.1. REDES NEURAIIS NA ESTIMAÇÃO DO DIÂMETRO

A arquitetura proposta para a estimação do diâmetro utilizou como parâmetro de entrada na rede a média dos sinais medidos durante os ensaios (aceleração, emissão acústica, potência, força em X, força em Y e força em Z).

Adicionado aos sinais foram colocados os parâmetros de usinagem utilizados. Para incluir o efeito dos diferentes diâmetros da ferramenta, mostrados na Tabela 4, e acrescentar a variação da velocidade de corte, ao invés de utilizar a rotação do cabeçote e a velocidade de avanço, foram calculados a partir deles a velocidade de corte e o avanço.

As saídas esperadas das redes foram o diâmetro máximo e diâmetro mínimo de cada furo medido. A arquitetura da rede proposta está mostrada na Figura 31.

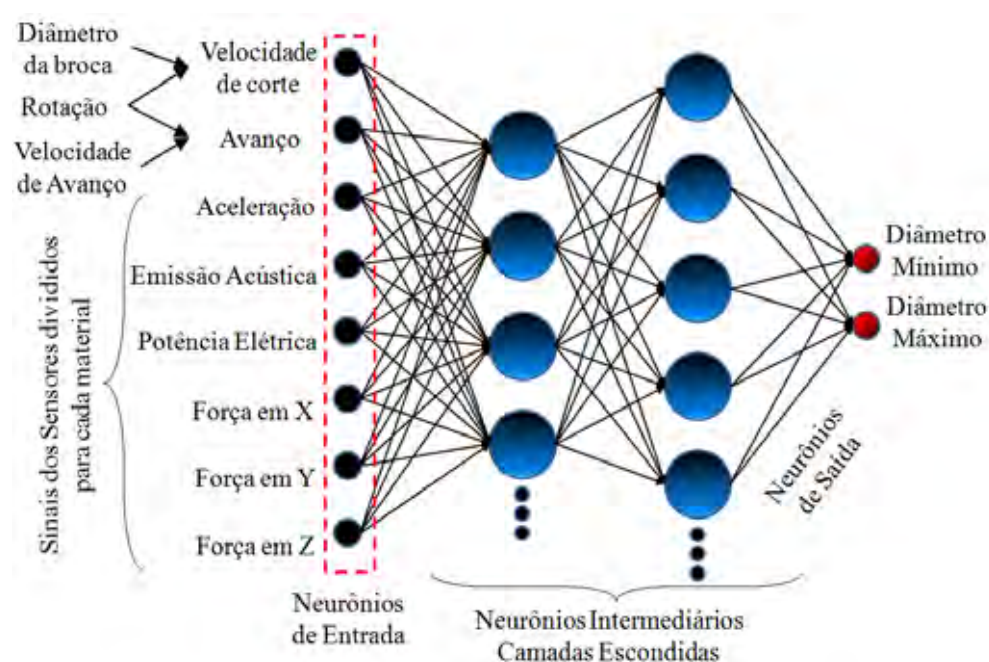


Figura 31. Arquitetura da rede neural artificial utilizada na estimativa do diâmetro do furo usinado

Como se tivessem sido feitos em processos distintos os sinais e medidas de diâmetro de cada material foram utilizados separadamente. De todas as combinações testadas de parâmetros internos a rede, realizados de forma automática, conforme descrito acima, aquela que apresentou menor erro na determinação dos diâmetros foi escolhida para realizar os demais testes do trabalho. Os parâmetros utilizados na constituição desta rede estão mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros da rede utilizada na estimação do diâmetro

Número de camadas:	3
Número de Neurônios por camada:	[15 10 15]
Função de transferência entre neurônios da camada escondida:	tansig
Função de transferência para a camada de saída:	purelin
Momento:	0,3
Taxa de Aprendizagem:	0,2
Número máximo de épocas:	200
Erro (objetivo):	10^{-7}
Função de treinamento do algoritmo BackPropagation:	trainlm
Função de aprendizado e atualização dos pesos sinápticos:	learnqdm

5.10.2. REDES NEURAIS NA ESTIMAÇÃO DA RUGOSIDADE MÉDIA

Da mesma forma que foi realizado para a estimação do diâmetro a rede utilizada para estimação da rugosidade média também utilizou os sinais dos sensores somados aos parâmetros de corte como padrões de entrada, sendo que neste caso o valor de saída era único e correspondia a Rugosidade Média (Ra) lida naquele furo. Mais uma vez os sinais e medidas referentes a cada material foram tratados separadamente. A arquitetura discutida está apresentada na Figura 32.

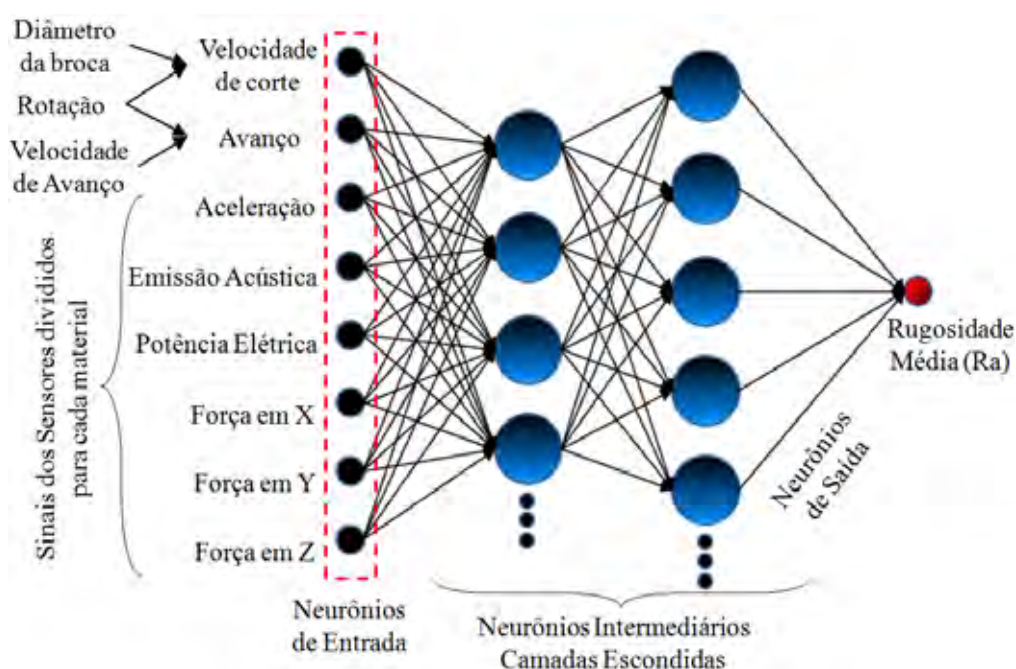


Figura 32. Arquitetura da rede neural artificial utilizada na estimação da rugosidade média da parede interna do furo

A Tabela 10 mostra os parâmetros ajustados para a rede neural nesta aplicação.

Tabela 10 – Parâmetros da rede utilizada na estimação da rugosidade (Ra)

Número de camadas:	3
Número de Neurônios por camada:	[10 10 5]
Função de transferência entre neurônios da camada escondida:	tansig
Função de transferência para a camada de saída:	purelin
Momento:	0,8
Taxa de Aprendizagem:	0,15
Número máximo de épocas:	200
Erro (objetivo):	10^{-7}
Função de treinamento do algoritmo BackPropagation:	trainlm
Função de aprendizado e atualização dos pesos sinápticos:	learngdm

As análises e resultados conseguidos com o método proposto acima estão mostrados no capítulo que segue.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as discussões acerca dos resultados obtidos no processo de furação, o comportamento dos sinais provindos dos sensores, da rugosidade e do diâmetro do furo em relação à variação dos parâmetros de corte. Encerrando o capítulo são abordadas as redes neurais artificiais e sua capacidade em realizar a estimação das variáveis desejadas.

6.1. COMPORTAMENTOS DOS SINAIS LIDOS E SUA VARIAÇÃO COM OS DIFERENTES PARÂMETROS DE CORTE

Conforme descrito na seção 5.7, os sinais adquiridos durante os ensaios inicialmente foram seccionados através de rotinas computacionais, sendo que, só foi utilizada no trabalho, a região que se refere ao corte da ferramenta durante seu movimento de avanço contra o corpo de prova.

Esta região foi então separada em duas partes, sendo que a primeira, refere-se aos dois quintos ($\frac{2}{5}$) iniciais do total de pontos, e é associada ao corte da liga de titânio e os três quintos ($\frac{3}{5}$) de pontos restantes à liga de alumínio. Deste total de pontos de cada material foi calculada a média, e posteriormente estes valores foram utilizados para treinamento, validação e teste das redes neurais, sendo associados ao valor do diâmetro ou rugosidade medido naquele furo.

Anteriormente a apresentação dos resultados obtidos pelas redes neurais, o estudo destas médias permite analisar o comportamento global dos sinais lidos em relação aos diferentes parâmetros de corte utilizados. Para tanto, foram construídos os gráficos que seguem. Estas figuras mostram os dados em formato de gráficos de pareto, que foram obtidos através da determinação do valor médio e do desvio padrão de todas as médias

calculadas anteriormente, relativas a cada um dos furos. Baseado neste cálculo, a Figura 33 mostra o valor da força em Z para ambas as ligas ensaiadas.

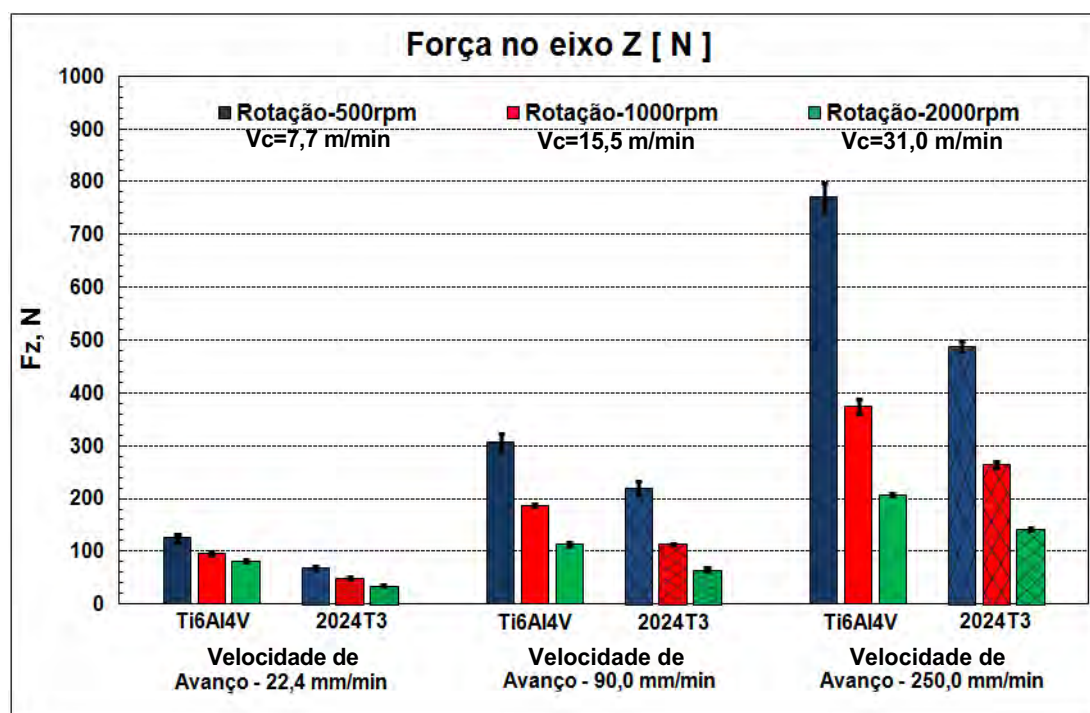


Figura 33. Média e desvio padrão dos sinais de força em Z para as diferentes condições de usinagem ensaiadas

Da análise da Figura 33 é possível perceber que há um aumento da força na direção do eixo Z com o aumento da velocidade de avanço. Isso pode ser explicado pelo fato de que, comparadas as mesmas rotações, com o aumento da velocidade de avanço, há uma maior taxa de extrusão (esmagamento de material) região da aresta transversal da broca e maior espessura do cavaco (h).

De forma análoga, é possível perceber que o aumento da rotação para uma mesma velocidade de avanço provocou queda no valor da força na direção do eixo Z, uma vez que diminui o avanço, e conseqüentemente, reduz a porção de material retirado a cada revolução. Esta diferença da força no eixo Z em relação à rotação do cabeçote pode ser mais bem percebida quando a velocidade de avanço de 250 mm/min foi utilizada. Nesta condição, há uma penetração muito rápida da ferramenta no material tornando crítica a porção removida em cada revolução. Além deste fator, quando a rotação da ferramenta é elevada, há um aumento no fluxo de cavaco em atrito com a ferramenta que ocasiona um aumento da temperatura na região de interface ente a ferramenta e cavaco, e reduz as propriedades mecânicas dos materiais usinados, facilitando o corte e a penetração da

ferramenta através da conformação do material, e conseqüentemente, causa uma queda no valor da força.

Na comparação entre materiais, nota-se uma maior força de avanço durante a usinagem da liga de titânio. Este resultado já poderia ter sido anteriormente percebido durante a análise da Figura 25 e Figura 27, onde os sinais mostram claramente dois patamares atingidos durante o ensaio, sendo maior o valor durante a usinagem do titânio. Como a liga de alumínio apresenta menor dureza em relação à liga de titânio a ferramenta de corte penetra mais facilmente neste material. Com a menor resistência à conformação na região da aresta transversal, há também menor força na direção do eixo vertical, o que explica os menores valores de força no eixo Z durante a usinagem do alumínio.

Da mesma forma, as Figura 34 e Figura 35 mostram respectivamente os valores das médias e desvios padrão das forças lidas pelo dinamômetro no eixo X e no eixo Y.

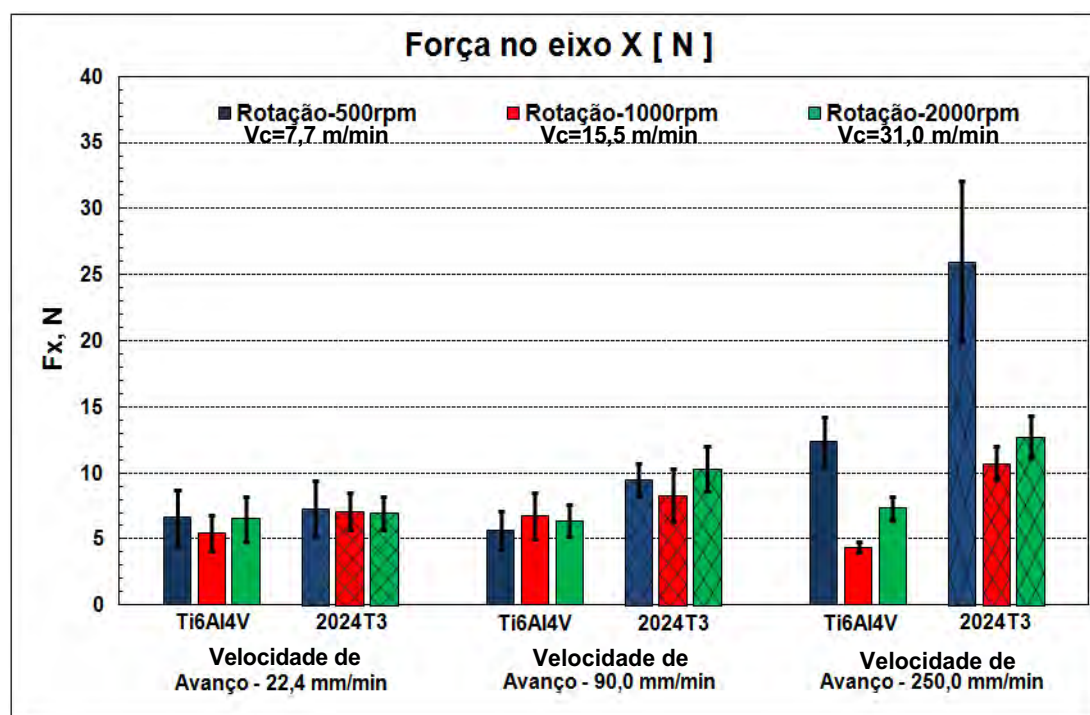


Figura 34. Média e desvio padrão dos sinais de força em X para as diferentes condições de usinagem ensaiadas

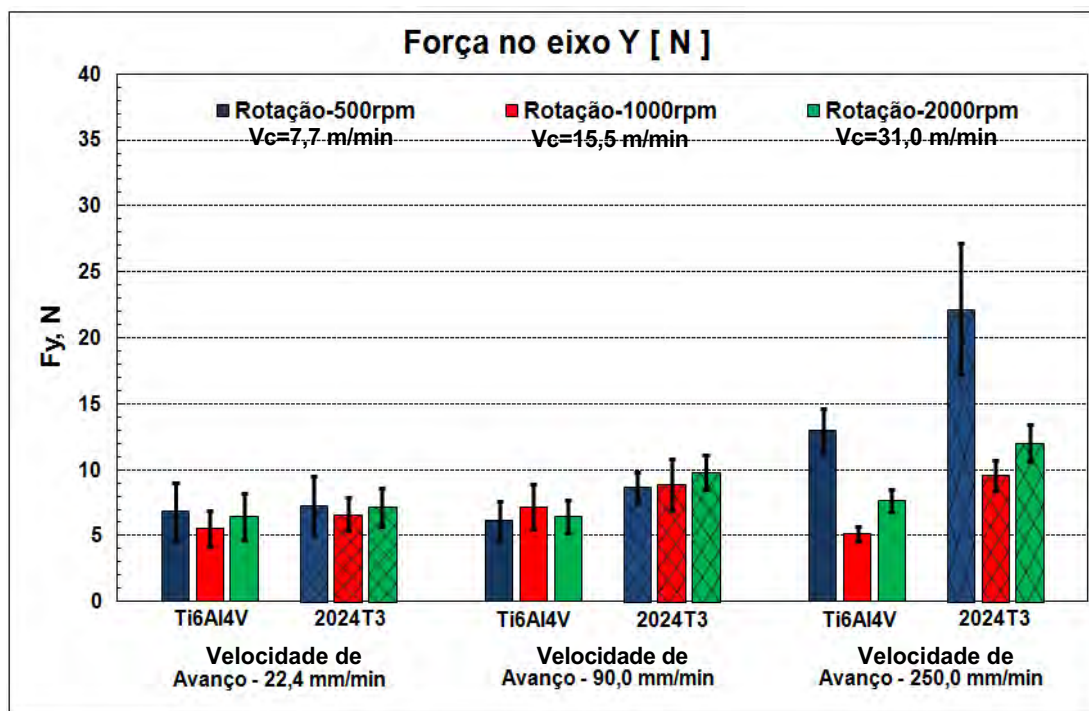


Figura 35. Média e desvio padrão dos sinais de força em Y para as diferentes condições de usinagem ensaiadas

Da análise das figuras pode-se afirmar que as forças de corte, no eixo X e eixo Y poderiam sem prejuízos aos resultados e as análises serem representadas por uma única resultante no plano paralelo à base da máquina uma vez que não há diferença significativa das forças em cada uma das direções, visto a similaridade entre os gráficos, sendo que, as pequenas diferenças encontradas, podem ser atribuídas à rigidez da máquina ferramenta em cada uma das direções.

Em relação à rotação é possível perceber que para a maioria das condições ensaiadas, destacando-se a de velocidade de avanço de 250 mm/min, os menores valores de F_X e F_Y foram obtidos quando a rotação de 1000 rpm foi utilizada. Este fenômeno pode ser explicado pela influência da formação de arestas postiças de corte (APC). Conforme descrito na seção 4.2.3, com o aumento da rotação, cresce a temperatura do processo, o que aumenta a formação de arestas postiças e diminui os valores forças de corte, uma vez que, a APC aumenta o ângulo efetivo de saída da ferramenta, que está diretamente ligado ao trabalho de deformação envolvido na formação do cavaco. Quanto maior o ângulo de saída, menor o fator de recalque e, conseqüentemente, menores serão as forças necessárias para cortar o material.

A formação da aresta postiça de corte cresce gradativamente com o aumento da temperatura até que a temperatura de recristalização do material usinado é ultrapassada. Neste momento não há mais formação da APC, uma vez que a alteração na microestrutura do material impede seu encruamento, fator necessário a formação da aresta postiça. Denomina-se de velocidade crítica, a velocidade de corte que impõe ao processo temperaturas acima da recristalização do material usinado e com base nos resultados obtidos pode-se afirmar que para o processo estudado, ela é dada entre as rotações de 1000 rpm e 2000 rpm, o que o explica a maior força de corte para a maior e menor rotação utilizada.

As figuras 34 e 35 também mostram que houve uma elevação dos valores das forças de corte com o aumento da velocidade de avanço justificado pela maior espessura do cavaco. Ainda é importante ressaltar que, o alto desvio padrão que pode ser visto nesta figura se deve ao fato de que o gráfico foi construído a partir da média dos sinais de todos os furos desta condição de usinagem. A inadequada combinação entre velocidade de corte e avanço utilizada levou a um excessivo desgaste das arestas principais da ferramenta, alterando o valor da força furo a furo, e ocasionando grandes diferenças dos resultados em relação à média, o que explica o alto desvio padrão obtido.

Na comparação entre materiais é possível perceber que, ao contrário do que ocorreu na força de avanço, os valores da força de corte foram maiores no alumínio que no titânio. Isto se deve a maior ductilidade do alumínio que o leva formação de cavacos com grandes áreas de contatos cavaco-ferramenta, ao contrário do titânio, onde estas áreas de contatos são pequenas e chegam a ser um terço ($1/3$) da do aço e um quinto ($1/5$) do Al. Apesar do titânio ser mais resistente, a maior área de contato de cavaco predominou, resultando em forças de corte maiores para a liga de alumínio.

Da mesma forma que foi apresentada para a força, o comportamento da potência elétrica do motor do cabeçote da máquina ferramenta pode ser visto na Figura 36.

Da análise da Figura 36 nota-se que há um crescimento dos valores de sinal de potência com o aumento da velocidade de avanço, para quase totalidade dos casos, exceto quando esta velocidade passou de 90 mm/min para 250 mm/min, na usinagem da liga de alumínio, utilizando as rotações de 500 rpm e 2000 rpm. Nestes casos, os valores podem ser considerados estatisticamente iguais.

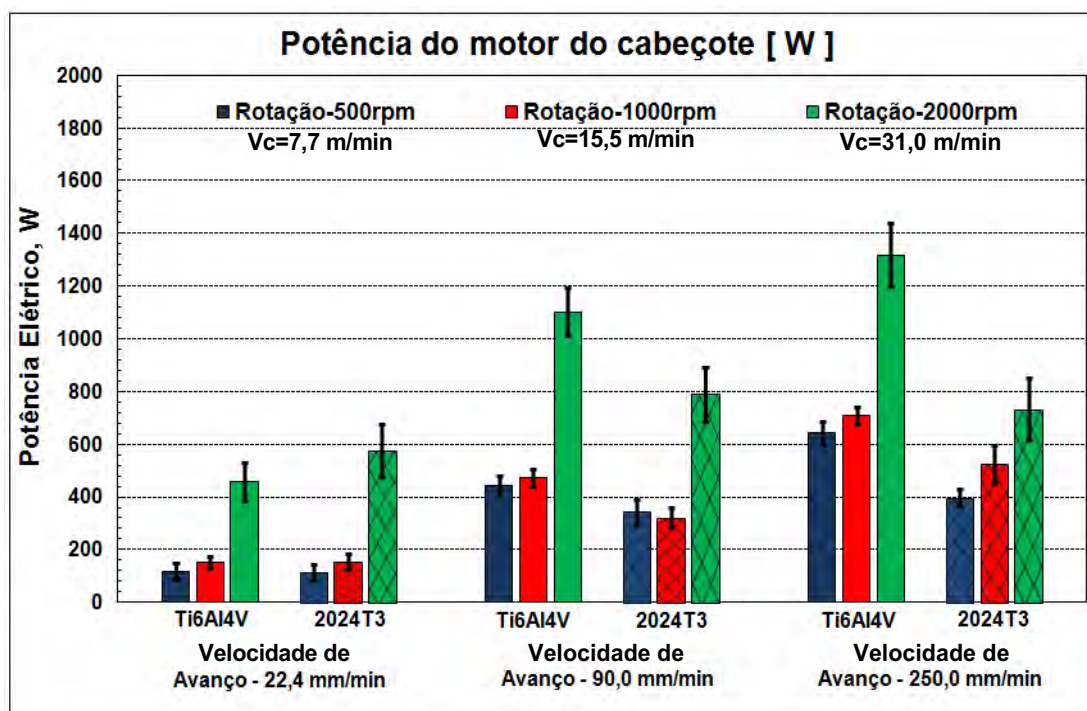


Figura 36. Média e desvio padrão dos sinais de potência para as diferentes condições de usinagem ensaiadas

É importante salientar que, o motor elétrico responsável por girar a ferramenta e que foi instrumentado não é responsável pelo avanço do cabeçote da máquina na direção do eixo Z. Este movimento é feito por um segundo motor e, portanto, o acréscimo de potência com o aumento da velocidade de avanço não pode ser atribuída a uma maior dificuldade do motor em avançar contra a peça, sendo que este fenômeno deve-se exclusivamente à maior dificuldade de corte quando há uma porção maior de material a ser removido em cada revolução. Sabendo-se que a potência de corte pode ser obtida através do produto da força de corte pela velocidade de corte, era esperado que os sinais de potência apresentassem um comportamento similar aos obtidos nos gráficos de F_X e F_Y , o que não ocorreu.

Nota-se que o aumento da velocidade de avanço e da rotação provocaram aumento no valor da potência elétrica consumida pelo motor do cabeçote e que na comparação entre materiais houve uma maior potência depreendida durante a usinagem da liga de titânio, sendo esperado o contrário, visto as maiores forças apresentadas pela liga de alumínio.

Acredita-se que parte do desvio encontrado nos resultados de potência elétrica em relação aos valores esperados deve-se a possíveis problemas ocorridos com este sinal durante e após os ensaios. O primeiro destes relaciona-se com a rede elétrica do laboratório

onde está instalada a máquina ferramenta utilizada no trabalho. Neste local, a máquina compartilha a instalação elétrica com outras máquinas e equipamentos que são constantemente utilizados. Possíveis problemas de aterramento dos equipamentos podem ter causado flutuações na corrente elétrica, o que afeta a leitura da potência. O segundo possível problema está relacionado ao tratamento dos sinais. Conforme descrito na seção 5.7 os sinais de potência apresentavam um atraso em relação às outras grandezas lidas, o que forçou a secção dos sinais de forma manual sem um critério rígido e uniforme de análise. Baseado nestes fatores, as redes neurais foram treinadas com e sem os sinais de potência elétrica. Como os resultados foram similares optou-se por manter estes sinais nas análises e composição da rede.

Dando continuidade à apresentação dos valores dos sinais lidos, o gráfico obtido a partir dos dados do acelerômetro é mostrado na Figura 37.

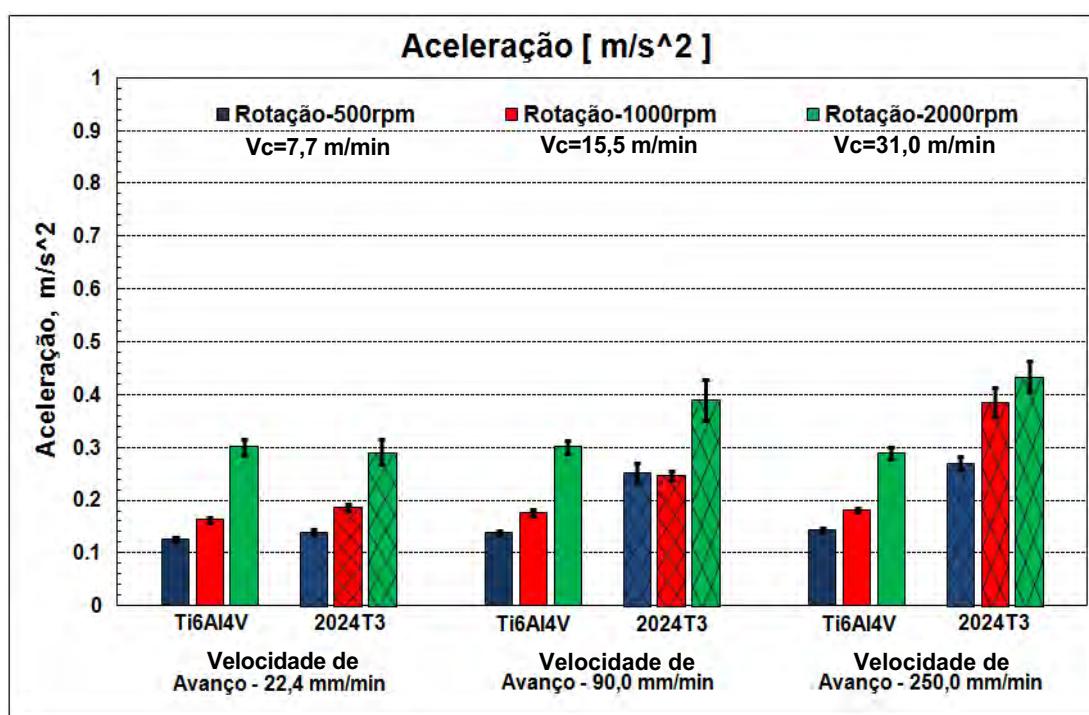


Figura 37. Média e desvio padrão dos sinais de aceleração para as diferentes condições de usinagem ensaiadas

A Figura 37 mostra que houve um crescimento do valor a aceleração com aumento da rotação. O mesmo ocorreu com o aumento da velocidade de avanço. Este comportamento está parcialmente atribuído comportamento dinâmico da máquina ferramenta, visto que durante os ensaios foi realizada uma aquisição em vazio da aceleração (vibração) da

máquina em relação à rotação utilizada, sendo esta, crescente dentro das rotações escolhidas para o trabalho.

Em relação aos materiais, notam-se maiores valores de aceleração durante a usinagem da liga de alumínio, que pode ser explicado pelo tipo de cavaco produzido durante a usinagem de cada um dos materiais. O ANEXO 3 apresenta amostras de cavacos coletados durante a usinagem de cada uma das condições de corte ensaiadas. A análise deste material permite verificar que a liga de alumínio apresentou cavacos menores e mais quebradiços, ocasionando fratura periódica do material em contato com a ponta da ferramenta, elevando assim a vibração.

Para encerrar a apresentação dos sinais, a Figura 38 mostra os resultados dos sinais de emissão acústica.

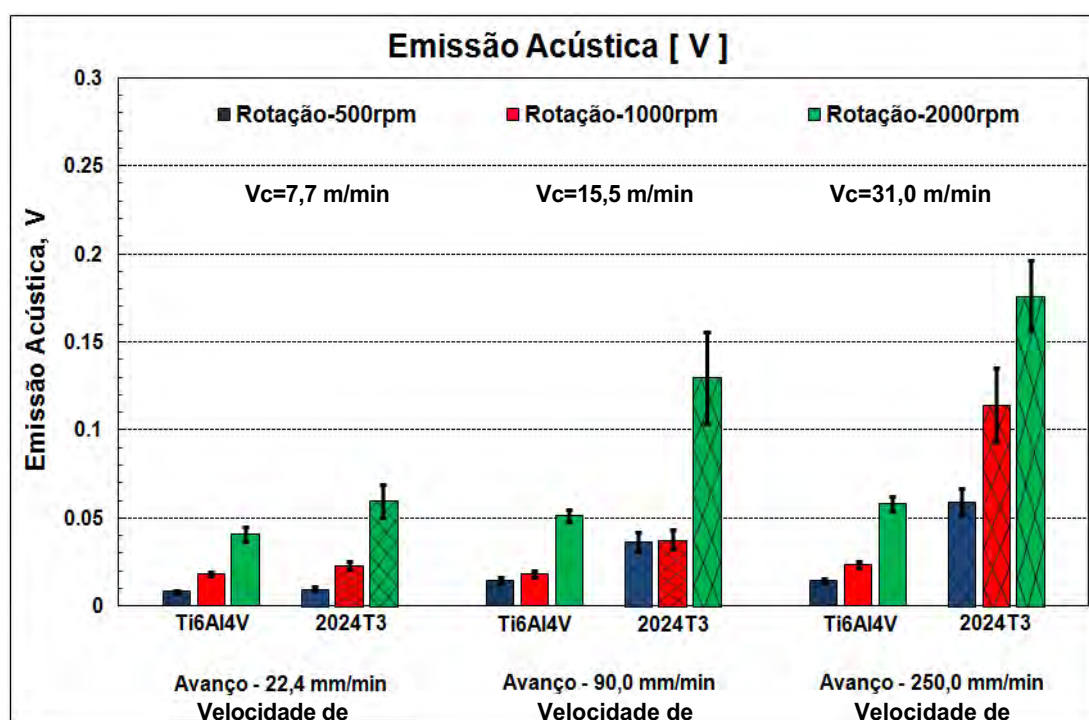


Figura 38. Média e desvio padrão dos sinais de emissão acústica para as diferentes condições de usinagem ensaiadas

A Figura 38 mostra que para quase todas as condições de usinagem testadas houve crescimento do sinal de emissão acústica com o aumento da rotação. Quando a velocidade de avanço foi aumentada também houve crescimento nos valores do sinal. Na comparação entre materiais nota-se um aumento nos valores médios durante a usinagem da liga de alumínio.

Estes resultados são atribuídos a dois fatores principais. O primeiro deles é que, conforme foi apresentado na seção 4.5 uma das principais características atribuídas ao sensor de emissão acústica quando utilizado em processo de usinagem, é a sua capacidade única de captar a energia propagada durante o retorno da deformação elástica no momento em que ocorre a fratura frágil da porção de cavaco. Desta forma, quanto mais quebradiço for o cavaco gerado, maior o sinal de emissão acústica. A análise do ANEXO 3 mostra que a liga de titânio apresentou cavacos longos, segmentados e em forma de fita. Já o alumínio, teve comportamento mais frágil, com cavacos quebradiços, o que justifica os maiores níveis de emissão acústica percebidos durante sua usinagem.

O segundo fator o avanço e para liga de alumínio, o que justifica os valores obtidos na Figura 38.

6.2. COMPOTAMENTO DO DIÂMETRO DO FURO USINADO E UTILIZAÇÃO DAS REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

Como foi descrito no item 5.7, devido à diferença entre os materiais e aos erros geométricos intrínsecos a qualquer processo de usinagem, cada furo medido neste trabalho apresenta quatro (4) valores de diâmetro associados, sendo: diâmetro máximo e mínimo da liga de titânio e diâmetro máximo e mínimo da liga de alumínio.

O ANEXO 1 mostra gráficos de linhas com os quatro valores de diâmetro medidos furo a furo para cada uma das condições de usinagem testadas. Estes gráficos foram construídos para que seja possível ao leitor verificar o comportamento do diâmetro ao longo da realização dos ensaios, principalmente quando as condições de usinagem menos convencionais (alta rotação e baixa velocidade de avanço, ou alta velocidade de avanço e baixa rotação) foram utilizadas.

A Tabela 11 mostra um resumo dos diâmetros máximo, mínimos e médio, obtidos em cada um dos materiais utilizados e condições de usinagem.

Tabela 11 – Resumo dos diâmetros medidos nos ensaios para ambas as ligas

Rot I Vel.Av	Ti6Al4V			2024T3			Variação diâmetral Máxima
	Diâmetro Máximo	Diâmetro Mínimo	Diâmetro Médio	Diâmetro Máximo	Diâmetro Mínimo	Diâmetro Médio	
500 / 22,4	4,988	4,939	4,966	5,049	4,992	5,015	0,110
1000 / 22,4	4,991	4,948	4,962	5,049	4,976	5,007	0,101
2000 / 22,4	5,073	4,954	5,010	5,085	5,001	5,048	0,131
500 / 90,0	4,986	4,939	4,958	5,028	4,954	4,983	0,089
1000 / 90,0	4,99	4,949	4,966	5,023	4,969	4,991	0,074
2000 / 90,0	5,005	4,953	4,978	5,069	4,971	5,009	0,116
500 / 250	4,991	4,936	4,959	5,059	4,961	4,991	0,123
1000 / 250	4,977	4,939	4,959	5,018	4,952	4,981	0,079
2000 / 250	4,986	4,953	4,968	5,031	4,974	4,995	0,078

Da análise da Tabela 11 é possível perceber a grande variação diametral medida nas análises decorrente dos diferentes parâmetros utilizados. Se analisados todas as condições testadas encontrou-se um variação de 0,149 mm (um décimo e meio de milímetro) considerado bastante alto para um processo de furação de precisão.

A Tabela 11 também permite verificar que para todas as condições testadas o diâmetro medido na liga de alumínio apresentou diâmetro sempre superior aos valores obtidos na liga de titânio. Este resultado já poderia ser esperado, visto o comportamento dos sinais de força de corte, aceleração e emissão acústica abordados anteriormente. Além disso, atribuem-se este resultado a menor dureza e menor resistência à abrasão deste material sendo que, com o atrito do cavaco contra a parede do furo, há cisalhamento da superfície de material alterando a sua dimensão.

Para facilitar a visualização e comparação entre parâmetros de corte utilizados, foi construída a Figura 39 que mostra a média e desvio padrão dos valores de diâmetro para todas as condições de usinagem testadas.

Da análise Figura 39, nota-se que, para uma mesma velocidade de avanço, o diâmetro médio nas amostras apresentou tendência a ficar maior com o aumento da rotação, sendo que para algumas condições a diferença foi bastante significativa, como é verificado na condição mais a esquerda da figura, onde a utilização da rotação de 2000 rpm causou um grande degrau nos valores do gráfico.

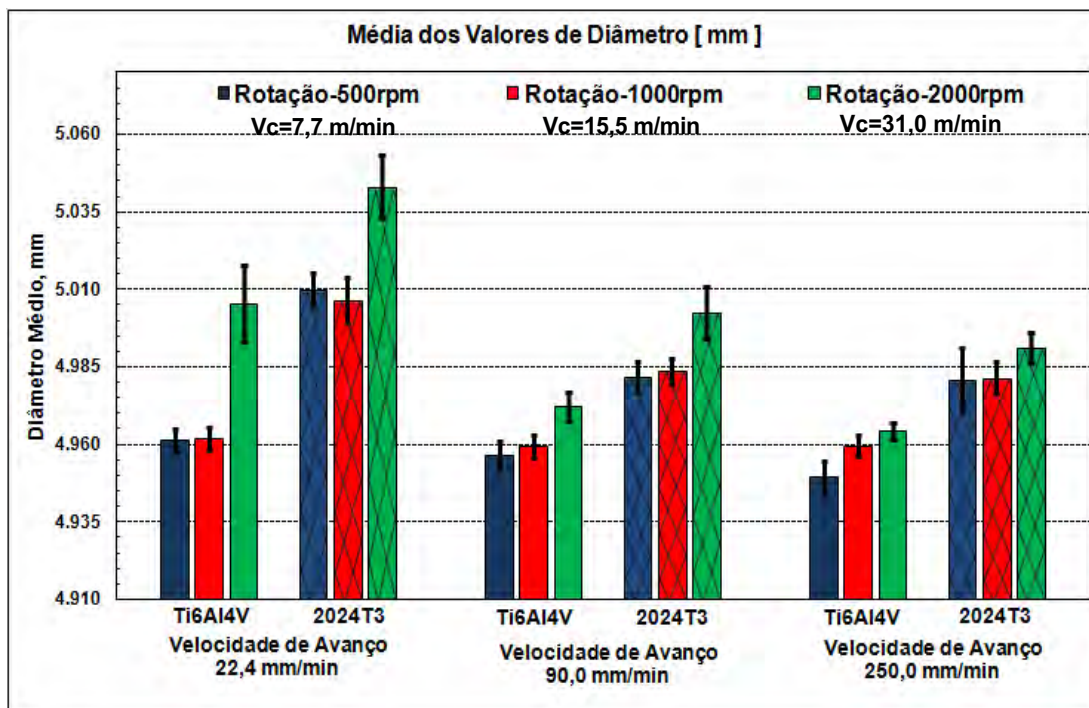


Figura 39. Média dos valores do diâmetro dos furos para as diferentes condições de usinagem testadas

Em relação à velocidade de avanço, é possível verificar que para algumas condições houve decréscimo no valor do diâmetro médio com o aumento da velocidade de avanço se comparadas, as mesmas rotações. Em outras, os valores se mantiveram praticamente iguais. Além disso, o diâmetro apresentou maiores valores quando utilizada a velocidade de avanço de 22,4 mm/min. Atribui-se este fenômeno ao longo e fino cavaco, em forma de fita, formado nesta condição. Este cavaco dobra-se muito facilmente apresentando assim dificuldade em deixar o interior do canal da ferramenta atritando com a parede do furo.

Mais uma vez vale destacar, que as condições de corte escolhidas para o ensaio provocaram considerável diferença nos valores de diâmetro, sendo que os menores valores medidos estão na casa de 4,940 mm e os maiores da ordem de 5,070 mm. Para a realização do trabalho, esta variação é bastante positiva uma vez que permite avaliar o comportamento das redes frente a elas.

Utilizando as arquiteturas descritas na seção 5.10 foram realizados os testes com as redes neurais. As figuras 40 a 43 mostram o comportamento das redes na determinação do diâmetro mínimo e máximo de cada um dos materiais.

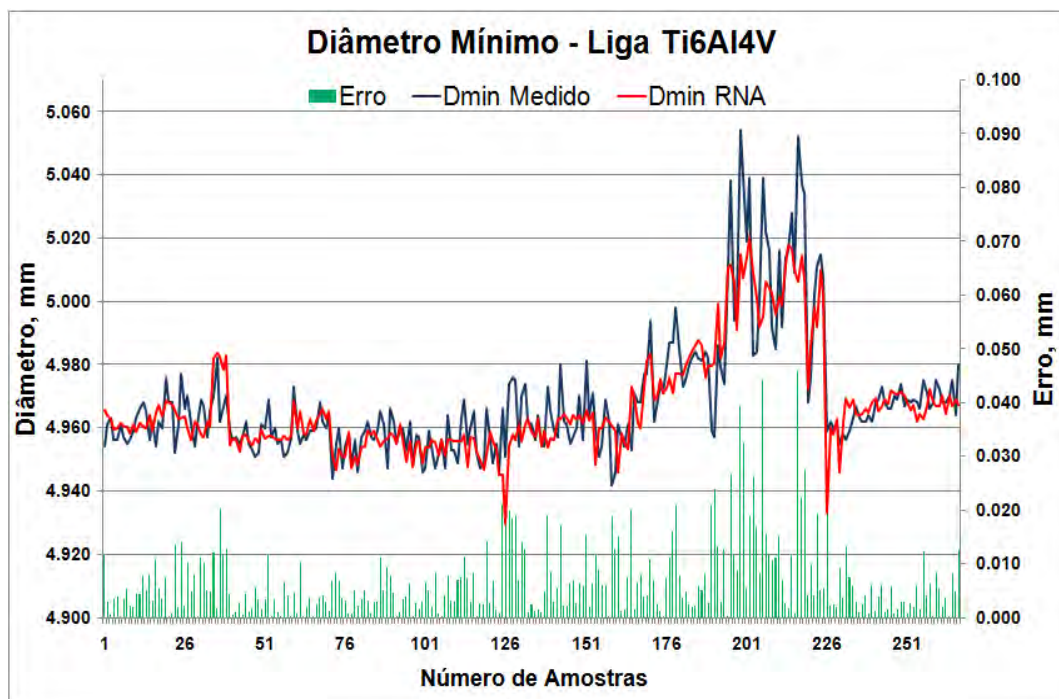


Figura 40. Rede neural aplicada à determinação do diâmetro mínimo na liga de titânio

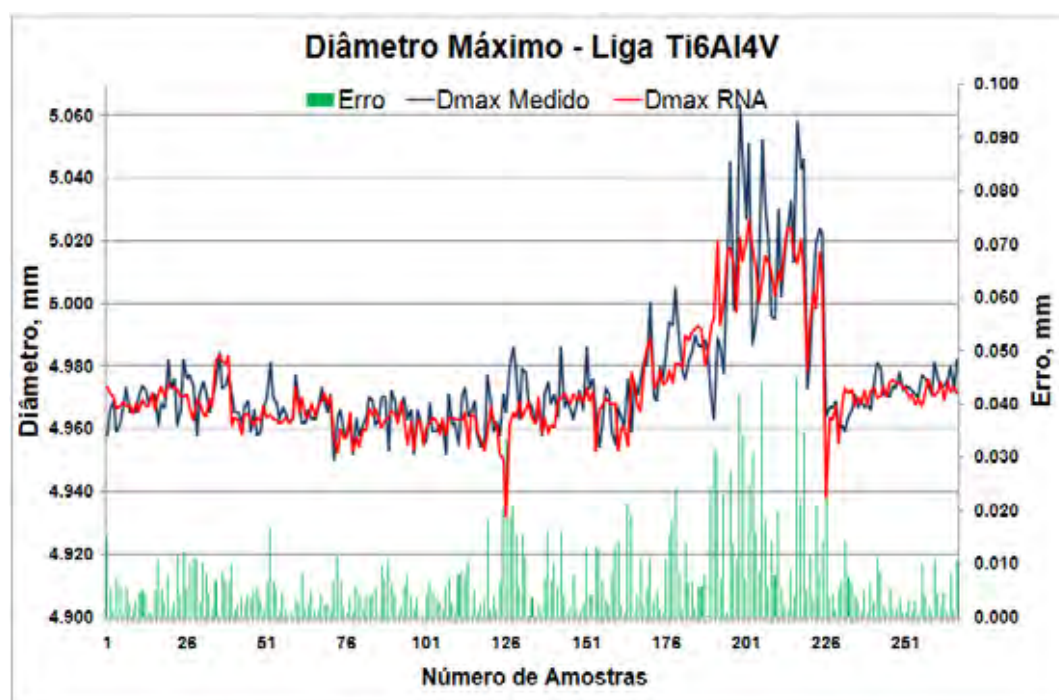


Figura 41. Rede neural aplicada à determinação do diâmetro máximo na liga de titânio

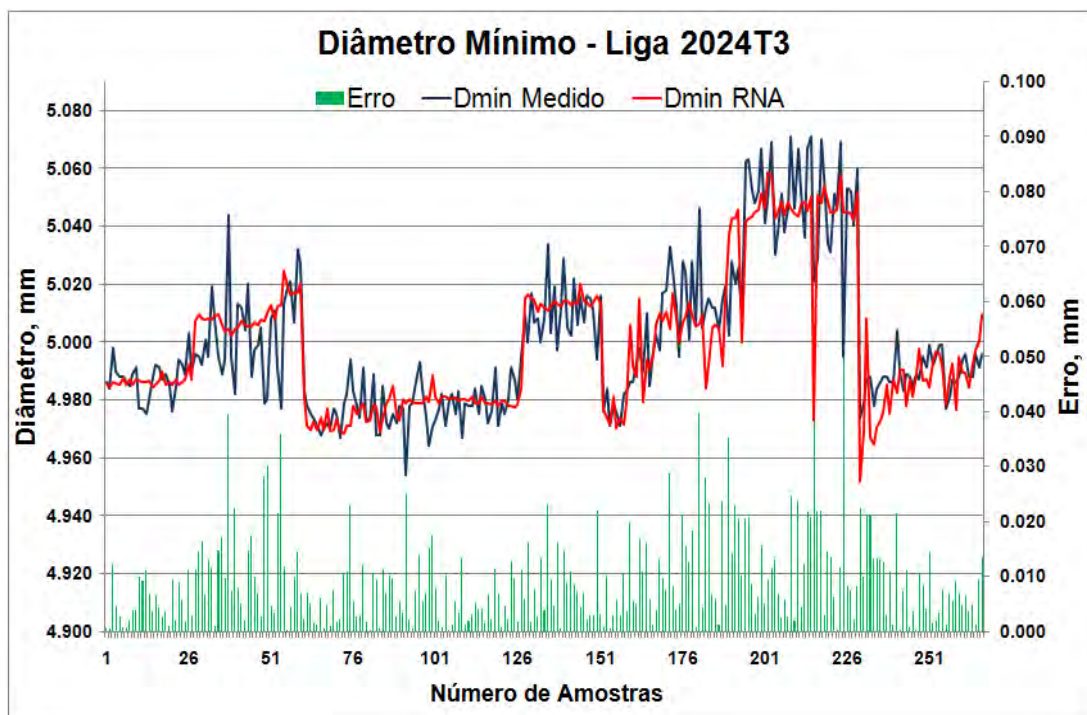


Figura 42. Rede neural aplicada à determinação do diâmetro mínimo na liga de alumínio

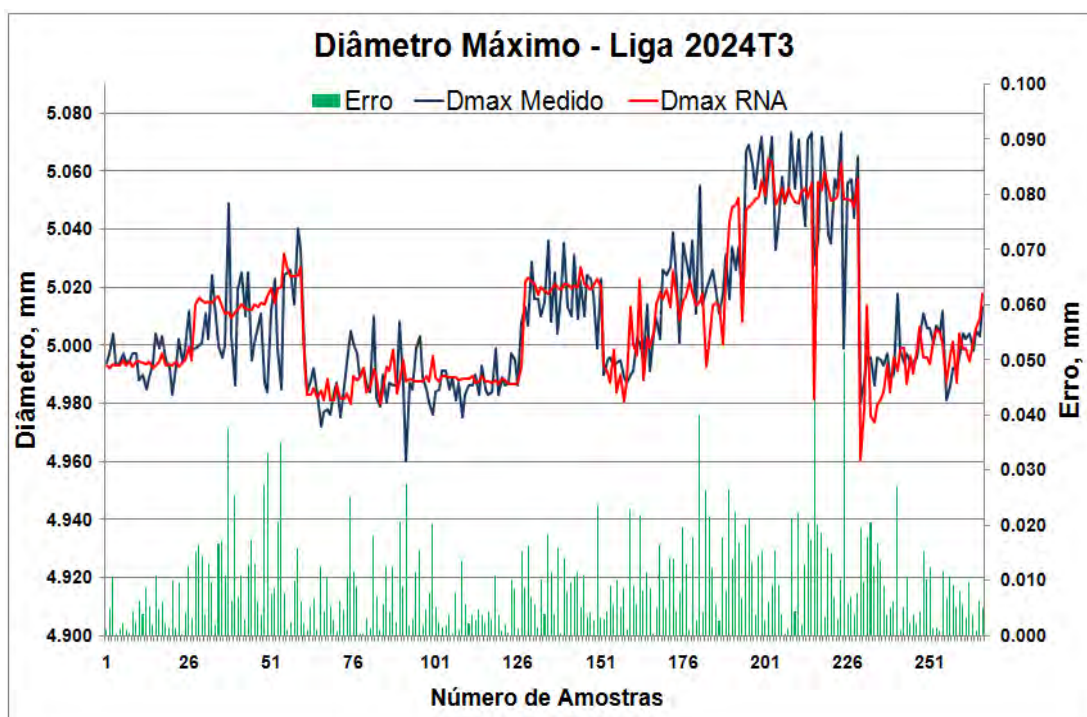


Figura 43. Rede neural aplicada à determinação do diâmetro máximo na liga de alumínio

A análise das Figuras 40 a 43 mostra que as arquiteturas propostas obtiveram comportamento bastante satisfatório frente às oscilações de diâmetro ocorridas no processo. Essa afirmação baseia-se no fato de que é possível perceber que o comportamento da rede sempre esteve acompanhando os aumentos e decréscimo do processo, sendo que de certa forma chega a lembrar o traço de linhas médias nos diferentes patamares do gráfico, sendo ela insensível a variações bruscas no processo.

Para obter a eficiência do sistema, foram calculados os erros do processo através da comparação dos valores de diâmetro máximo e mínimo de cada um dos materiais estimados pela rede com os valores reais medidos com instrumento. A partir destas diferenças foram calculados os erros mostrados na Tabela 12. O Erro médio relativo foi determinado pela média do módulo da diferença entre o valor estimado pela rede e o valor de diâmetro medido com instrumento. Esta diferença quando dividida pelo valor do diâmetro médio resultou no erro médio absoluto.

Tabela 12 – Valores de erros médios apresentados pelas redes na determinação do diâmetro dos furos

	Erro Médio Absoluto (%)	Erro Médio Relativo (mm)
Ti6Al4V - Diâmetro Mínimo	1,36E-03	0,0068
Ti6Al4V - Diâmetro Máximo	1,47E-03	0,0073
2024T3 - Diâmetro Mínimo	1,68E-03	0,0084
2024T3 - Diâmetro Máximo	1,79E-03	0,0090
Média	1,58E-03	0,0079

Avaliando o valor de erro médio absoluto é possível afirmar que a forma apresentada para determinação do diâmetro dos furos a partir de sensores e redes neurais artificiais é eficaz para quase que a totalidade dos processos industriais, uma vez que erros da ordem de 0,008 mm podem ser considerados pequenos ou desprezíveis para a maior parte destes processos. Como exemplo pode-se citar a indústria aeronáutica, onde os furos de maior precisão tem sua tolerância geralmente em torno de 0,050 mm sendo que o erro apresentado poderia facilmente ser incorporado por um processo, desde que ele não apresentasse valores marginais a norma.

A média apresentada na Tabela 12 apesar de ser um bom indicativo da eficiência do processo de determinação de furos não permite uma análise clara do comportamento da rede para cada furo.

Para possibilitar esta análise, foram construídos os gráficos das Figuras 44 e 45 que mostram os erros dos diâmetros máximos e mínimo de cada um dos materiais separados em classes.

A análise destas figuras reafirma o que foi dito acerca da eficiência do processo. Nota-se que para a liga de titânio quase metade dos valores apresentam erros inferiores a 0,005 mm. Considerando a resolução do equipamento utilizado para a medição do diâmetro dos furos, também de 0,005 mm, podemos afirmar que para estas amostras, a rede acertou o valor do diâmetro medido, uma vez que, dada a resolução do equipamento, não se pode afirmar com certeza o valor do diâmetro dentro desta margem de erro.

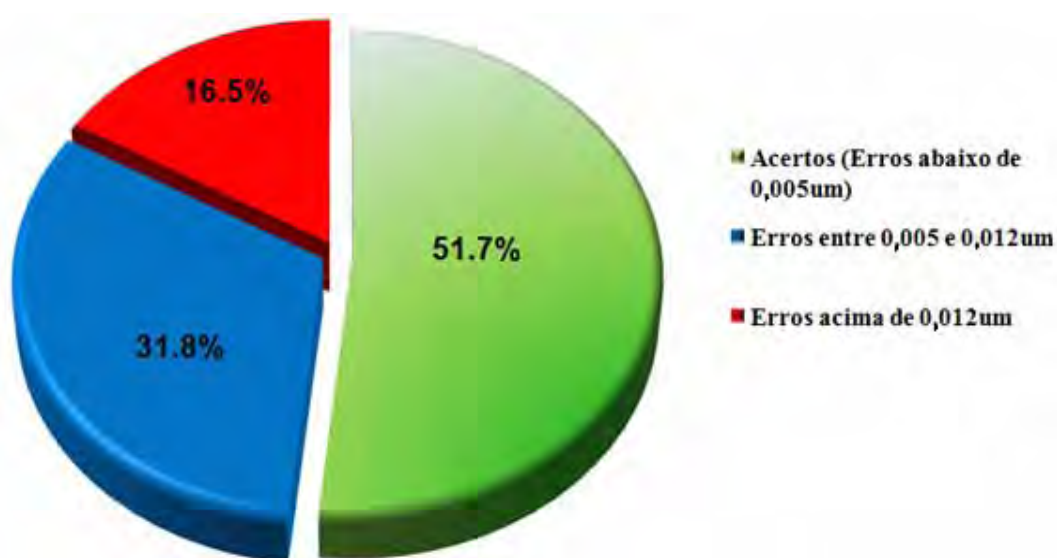


Figura 44. Distribuição de amostras em classes de erro (estimação do diâmetro)
Material Ti6Al4V

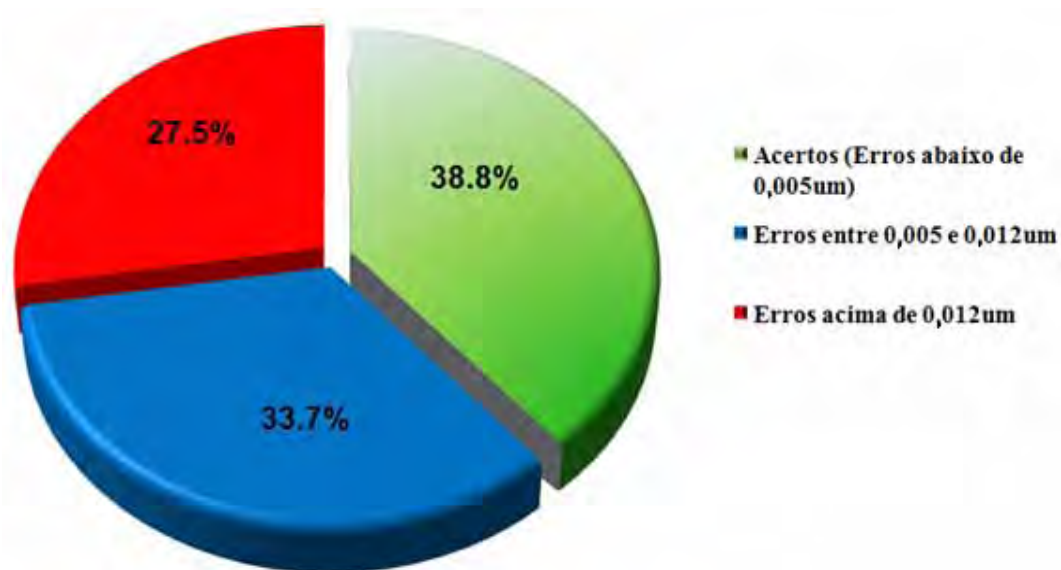


Figura 45. Distribuição de amostras em classes de erro (estimação do diâmetro)
Material 2024T3

Para a liga de alumínio, o percentual relativo a esta faixa de erro desprezível é um pouco menor, contudo nota-se que para ambas as ligas, a maior parte dos erros é inferior a 0,012 mm, sendo que na liga de titânio mais de oitenta e três por cento (83%) dos valores apresentaram erros inferiores a 0,012 mm e na liga de alumínio este valor atingiu mais de setenta e dois por cento (72%) das amostras.

Estes valores demonstram aplicabilidade do método empregado em controle de processos industriais. É animador imaginar uma linha onde milhares de furos são produzidos a cada dia, poder contar com um sistema que, sem gastar tempo e mão de obra para medir, determine o diâmetro de mais de setenta por cento (70%) dos furos produzidos com uma precisão inferior a 0,012 mm.

A aplicação de um sistema como esse em um campo industrial provavelmente não permitirá detectar com precisão uma possível falha pontual, mas certamente acusará a tendência a perda de tolerância de um processo evitando que milhares de furos sejam feitos fora de padrão estipulado, e ocorra um descarte ou retrabalho de grande escala.

Os dados apresentados neste trabalho são, contudo, apenas um estudo pioneiro sobre a aplicação de sensores e redes neurais artificiais utilizados na determinação do diâmetro dos furos produzidos. Para aumentar a confiabilidade no método utilizado, verificar sua

abrangência e mesmo melhorar ainda mais os resultados aqui apresentados outros trabalhos nesta área devem ser conduzidos.

6.3. RESULTADO DAS REDES NEURAIS APLICADAS À ESTIMAÇÃO DA RUGOSIDADE DO FURO USINADO

Conforme descrito no item 5.9, devido à demora e custo da medição, a rugosidade dos furos foi medida de forma amostral, sendo realizada através de amostras que continham um furo medido a cada sete furos realizados.

Da mesma forma que para o diâmetro, a rugosidade obtida também apresenta valores distintos para cada uma das ligas estudadas. Assim, para cada furo, foi medida a rugosidade da liga titânio e da liga de alumínio. O ANEXO 2 traz o comportamento da rugosidade ao longo das amostras para cada condição de corte estudada. Nestas figuras, a rugosidade dos furos não medidos entre uma amostra e outra, foi aproximada através de interpolação linear dos dados.

Para melhor comparação, os resultados obtidos na determinação da Rugosidade Média entre as amostras, para cada condição de corte testada e cada material usinado, podem ser observados na Figura 46.

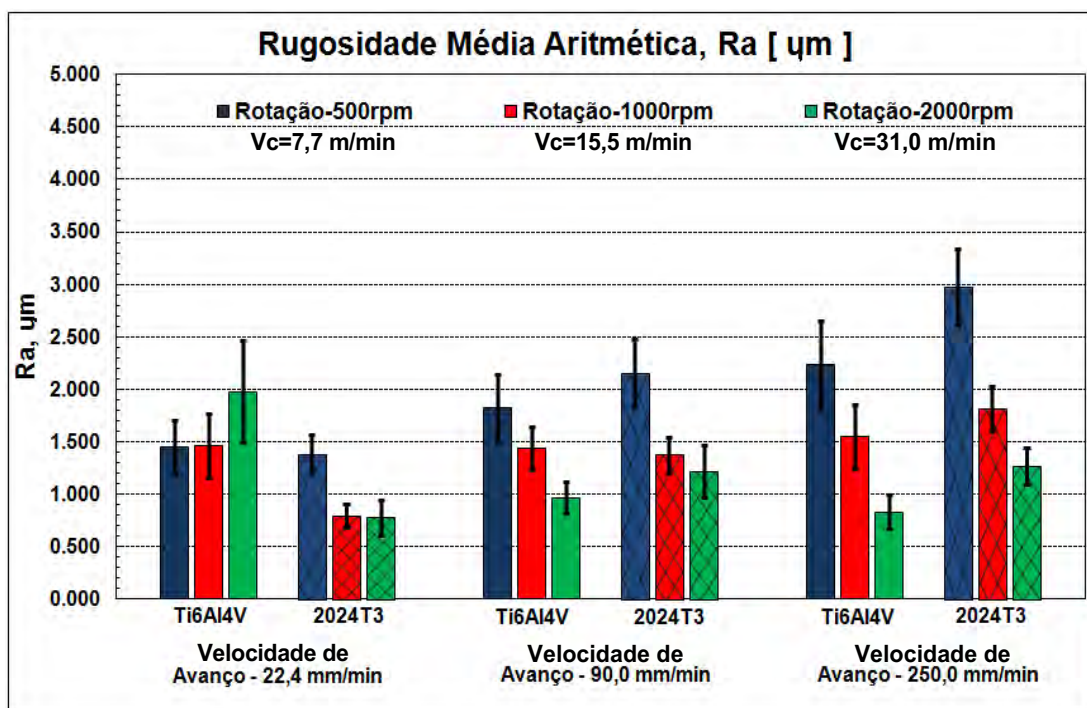


Figura 46. Média e desvio padrão da rugosidade medida para as condições de usinagem testadas

A Figura 46 mostra que houve um decréscimo da rugosidade com o aumento da rotação para quase totalidade dos casos. O contrario pode ser observado em relação ao aumento da velocidade de avanço provocou que um também aumento nos valores de rugosidade. Este fenômeno pode ser parcialmente explicado pelo efeito de formação de rosca intrínseco de processos de usinagem com movimento rotativo e avanço linear.

O corte produzido pela aresta da broca ao avançar sobre a ferramenta gera o aparecimento de uma rosca sobre a superfície usinada que pode ter maior ou menor passo dependendo da rotação e velocidade de avanço escolhidas. Quanto menor a rotação e maior o avanço, maior será também o fio de rosca produzido, que favorece uma superfície de rugosidade mais elevada.

É importante destacar que, durante a análise das forças de corte, foi atribuída a rotação de 1000 rpm, a condição de maior formação de aresta postiça de corte. Sabendo que este fenômeno tende a prejudicar o acabamento da região usinada, seriam esperados maiores valores de rugosidade média para esta rotação. Contudo, como foi supracitada, a aresta postiça de corte aumenta o ângulo efetivo de saída da ferramenta, causado uma redução nas forças de corte, diminuindo a temperatura e melhorando assim o acabamento. Desta

forma, para o processo estudado estes fatores se anularam e a formação da APC não pode ser visto como agravante à rugosidade.

Em relação aos materiais, nota-se que a superfície do titânio apresentou resultados de rugosidade inferiores. Este fenômeno mais uma vez é atribuído a menor dureza da liga de alumínio, que "risca" mais facilmente com a passagem do cavaco e também sofre maior influência das arestas irregulares geradas pelo fenômeno de formação de arestas postizas de corte.

Para utilização das redes neurais, os procedimentos descritos na seção 5.10.2 foram seguidos. Vale salientar que, para utilização nas redes neurais, aqueles furos que não foram medidos, tiveram o valor de sua rugosidade aproximada, através de uma interpolação linear entre o valor de rugosidade de um furo medido e de seu subsequente. Esta aproximação foi feita a fim de produzir dados suficientes ao treinamento, validação e teste das redes de forma similar ao que foi feito para a estimação do diâmetro.

O comportamento da rede frente às variações de rugosidade para cada um dos materiais estudados pode ser vista nas Figuras 47 e 48.

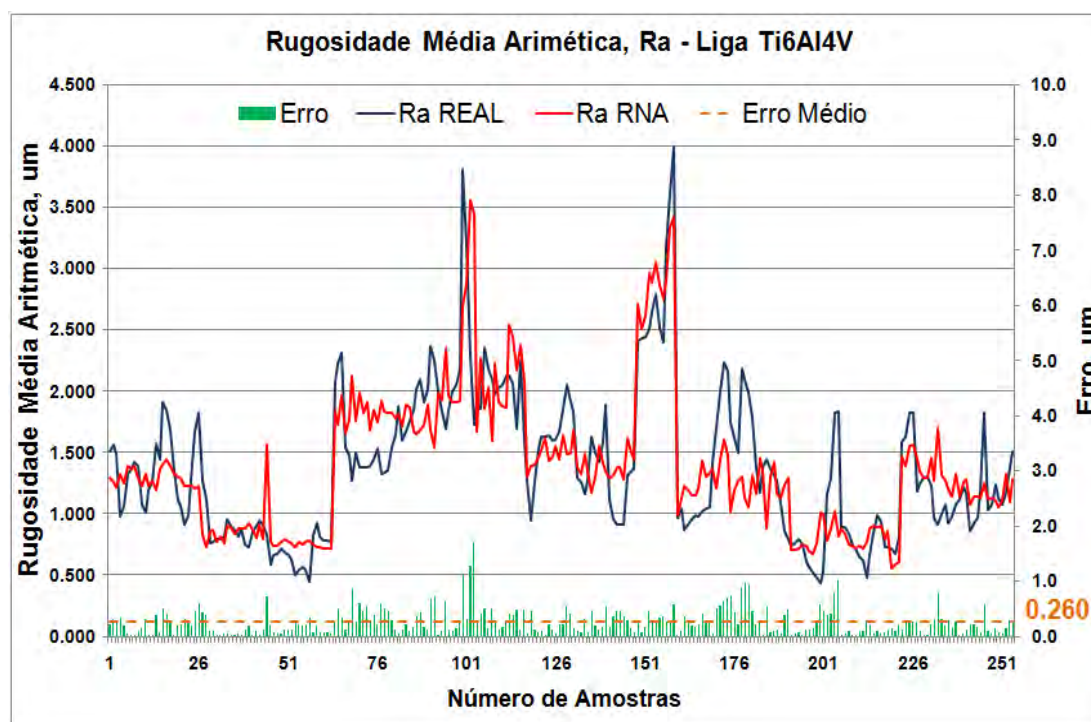


Figura 47. Rede neural aplicada à determinação da rugosidade média aritmética na liga de titânio

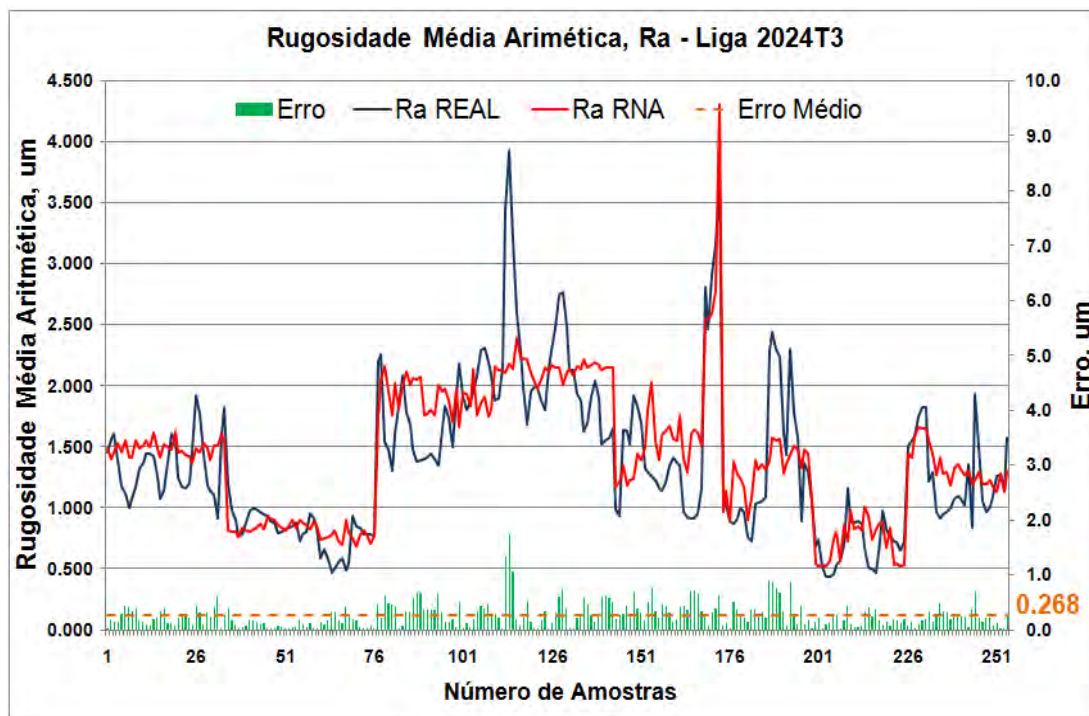


Figura 48. Rede neural aplicada à determinação da rugosidade média aritmética na liga de alumínio

De forma análoga ao ocorrido na determinação do diâmetro, nota-se que o comportamento da rede neural frente às variações de rugosidade para cada um dos materiais estudados foi bastante satisfatória, sendo que novamente as redes apresentaram baixa precisão de estimação quando houve uma variação pontual elevada, mas acompanharam de forma bastante precisa os patamares de rugosidade apresentados. Os erros médios em decorrência da utilização das redes podem ser vistos na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores de erros médios apresentados pelas redes na determinação do diâmetro dos furos

Material	Erro Médio Absoluto (%)	Erro Médio Relativo (μm)
Ti6Al4V	0,177	0,260
2024T3	0,189	0,268
Média	0,183	0,264

Mais uma vez percebe-se que os erros médios apresentados são baixos e aplicáveis a maior parte dos processos industriais. Mais uma vez cita-se a indústria aeronáutica como exemplo para justificar esta afirmativa.

No processo de fabricação de fuselagem, a rugosidade exigida em furos é geralmente inferior a $1,4\text{ }\mu\text{m}$ ou $1,6\text{ }\mu\text{m}$. Sendo assim, a estimação da rugosidade com erros na casa de $0,26\text{ }\mu\text{m}$ atende com bastante precisão a necessidade de supervisão do processo de usinagem.

Mais uma vez, os erros apresentados pelas redes foram percentualmente divididos em grupos. Como a máquina utilizada para medição da rugosidade exerce esta função com precisão acima das escalas utilizadas em processos de usinagem, diferentemente da análise realizada para a estimação do diâmetro, neste caso em nenhuma das hipóteses o erro pode ser considerado como inexistente. Sendo assim, os erros foram classificados conforme escala de critérios pessoais dos autores deste trabalho, baseado em suas experiências com processos de usinagem.

Nesta escala, os erros foram divididos em valores inferiores a $0,3\text{ }\mu\text{m}$, considerados baixos, erros entre $0,3\text{ }\mu\text{m}$ e $0,5\text{ }\mu\text{m}$, dados como aceitáveis e erros superiores a $0,5\text{ }\mu\text{m}$ considerados altos.

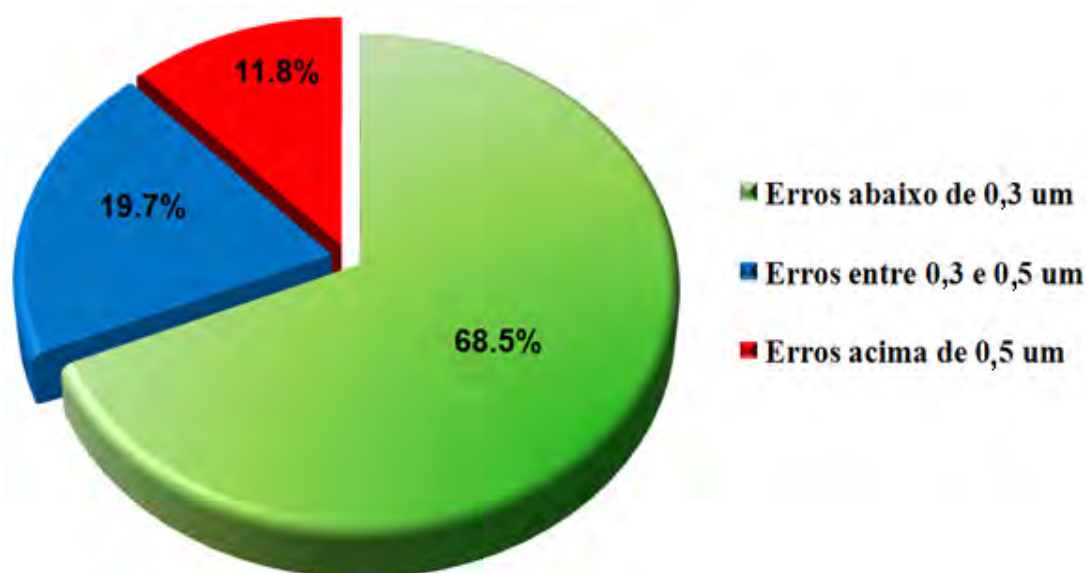


Figura 49. Distribuição de amostras em classes de erro (Estimação do Ra)
Material Ti6Al4V

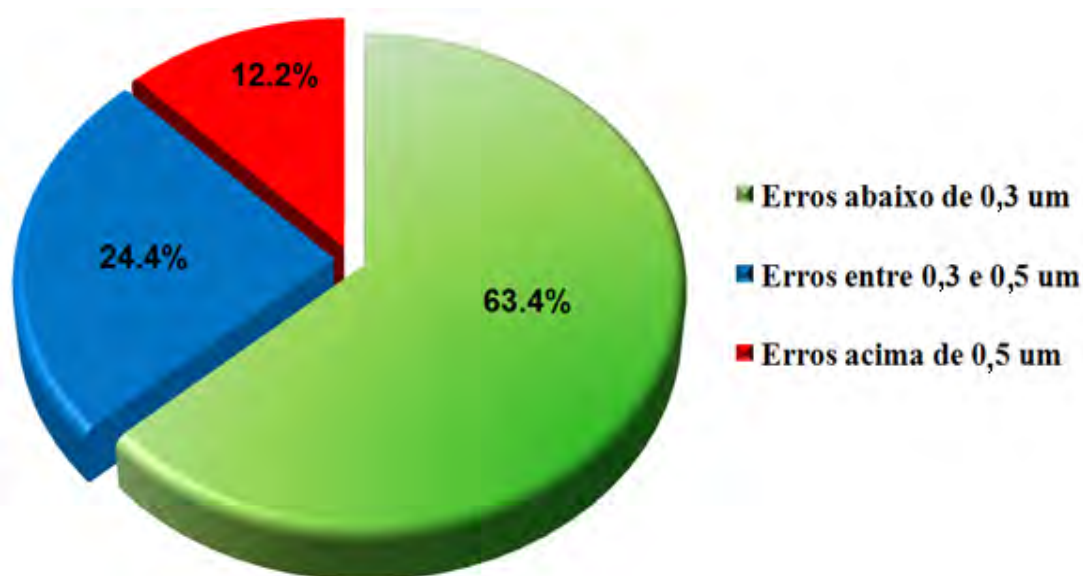


Figura 50. Distribuição de amostras em classes de erro (Estimação do Ra)
Material 2024T3

Na escala proposta, percebe-se mais uma vez que a maior parte dos erros está na faixa considerada baixa para aplicação na maior parte dos processos convencionais executados em indústrias.

Esses resultados demonstram mais uma vez aplicabilidade da técnica proposta para controle e supervisão de processos em ambientes industriais. Vale lembrar que uma aproximação foi utilizada para atribuir valores de rugosidade aos furos que não foram medidos, sendo que se acredita que, em se havendo dados provenientes de medições para todos os furos os resultados obtidos poderiam ser ainda melhores.

A eficiência do processo proposto para a estimação da rugosidade dos furos é ainda mais animadora para aplicação industrial considerando a dificuldade de executar esta medição em campo. Recorrendo mais uma vez aos exemplos de indústrias aeronáuticas, pode-se dizer que, enquanto medir o diâmetro de um furo realizado na fuselagem de uma aeronave é um processo trabalhoso e demorado, medir a rugosidade neste caso, diretamente no produto, é tarefa praticamente impossível, visto os equipamentos envolvidos em cada uma das medições.

Baseado nestas discussões e nos resultados apresentados reafirma-se mais uma vez o sucesso deste trabalho e da técnica aqui proposta. As redes neurais artificiais somadas a

sinais de sensores com dados provindos do corte mostraram uma poderosa ferramenta para a estimação da rugosidade e diâmetro do furo.

Mais uma vez destaca-se que apesar de ter demonstrado sucesso, as técnicas aqui empregadas devem ser mais bem estudadas o que certamente gerará melhoria nos resultados.

7. CONCLUSÕES

Os temas abordados na revisão bibliográfica desta pesquisa permitem-nos concluir que:

- 1) Os avanços alcançados no desenvolvimento das máquinas, computadores e materiais nas últimas duas décadas revolucionaram os métodos produtivos industriais. Na usinagem, robôs e máquinas de controle numérico computacional (CNC) permitem a realização dos processos com velocidade e qualidade superior. Apesar de desempenho e funcionalidade fantástica, estas máquinas ainda não estão aptas a desempenhar suas funções de forma autônoma uma vez que são incapazes de perceber variações não previstas em um processo ou meio, e trabalham sobre algoritmos rígidos de funcionamento. Para avançar neste objetivo, percebe-se que novos passos deverão ser dados no sentido de capacitar uma máquina a "sentir" e "pensar". Nesta direção, o uso de sensores e redes neurais artificiais apresenta-se como uma poderosa ferramenta, trazendo a capacidade sensitiva e decisória a uma máquina frente a uma perturbação inesperada ou a um processo não parametrizado.
- 2) Apesar da importância da furação, pesquisas que visam o controle desse processo limitam-se ao monitoramento do desgaste da ferramenta sendo que em muitos casos isso não é suficiente, uma vez que outros fatores afetam os resultados do processo no produto, como é o caso do diâmetro e da rugosidade dos furos abordados neste trabalho. A ausência deste controle onera a produção em campos industriais e não permite garantir a qualidade de todas as peças.
- 3) Frente aos problemas estruturais apresentados, oriundos da má concepção de um furo, pesquisas que visem desenvolver métodos capazes de reduzir ou detectar imperfeições em processos industriais aeronáuticos devem ser estimuladas, uma vez que podem impedir enormes prejuízos pessoais e materiais

Em relação aos métodos e resultados apresentados neste trabalho pode-se afirmar que:

- 1) Os métodos, equipamentos e materiais utilizados neste trabalho apresentaram comportamento adequado, dado a ausência de problemas durante os ensaios, a qualidade dos sinais lidos e os baixos valores de desvio padrão encontrados nas variáveis medidas (sinais dos sensores).
- 2) Os parâmetros de corte escolhidos para o desenvolvimento desta pesquisa trouxeram uma rica variação nos resultados do processo, demonstrada pelos vários formatos de cavacos obtidos, diferentes níveis de desgaste das ferramentas, e variações bastante representativas nos valores dos sinais lidos.
- 3) Os resultados advindos das redes neurais na determinação da dimensão do furo demonstraram elevada eficiência do sistema em determinar os diâmetros máximos e mínimos em cada um dos materiais testados, sendo que conforme dados apresentados, para a liga de titânio mais de cinquenta por cento (50%) dos dados podem ser considerados como exatos, uma vez que se encontram dentro da resolução do equipamento utilizado para sua medição (erros inferiores a 0,005 mm). No total das amostras para este material, mais de oitenta e três (83%) dos valores apresentaram erros inferiores a 0,012 mm considerados baixos ou mesmo desprezíveis para a maior parte dos processos industriais. Quando a mesma análise é repetida para a liga de alumínio, encontram-se trinta e oito por cento (38%) dos valores exatos e setenta e dois por cento (72,5) dos valores com erros inferiores a 0,012.
- 4) Na avaliação dos resultados obtidos com o uso das redes neurais na estimação da rugosidade, em ambos os materiais, os erros encontrados que estiveram abaixo de 0,3 μm , considerados baixos para a avaliação de um processo de usinagem, representam em torno de sessenta e cinco por cento (65%) dos dados amostrais. Quando adicionados a classe de erros aceitáveis (de 0,3 μm a 0,5 μm) estes dados ultrapassam a marca de oitenta e sete por cento (87%) das amostras.

Finalmente pode-se concluir que baseado nos resultados e discussões apresentados o método proposto mostrou-se bastante eficaz na determinação do diâmetro e rugosidade. Vale destacar que os resultados aqui apresentados se tornam ainda mais representativos quando leva-se em consideração a dificuldade de realizar a medição destas variáveis em ambientes industriais, no produto real. Se medir o diâmetro de um furo em uma fuselagem

já é uma tarefa dificultosa e demorada, a medição da rugosidade neste ambiente é praticamente impossível.

Destaca-se ainda que os resultados apresentados neste trabalho são pioneiros e abrem espaço para um novo e vasto campo de pesquisa, que certamente poderá melhorar os resultados aqui apresentados.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de melhorar as técnicas empregadas neste trabalho e baseando-se nos resultados obtidos, sugerem-se novas pesquisas que:

- 1) Apliquem a técnica aqui estudada em outros materiais, que não apenas os utilizados na indústria aeronáutica. Pelas características de usinabilidade dos aços acredita-se que a estimação do diâmetro nestes materiais possa ser feita ainda com mais precisão utilizando o método proposto.
- 2) Se repetida em materiais com baixo ponto de fusão e com tendência a formação de arestas postiças de corte, que seja adicionado um termopar na ferramenta, capaz de monitorar a temperatura do processo e associá-la a este fenômeno.
- 3) Também se sugere que novas ferramentas estatísticas que não a média sejam utilizadas para tratar os sinais que alimentarão as redes neurais. Para justificar esta sugestão, é necessária uma reflexão sobre a influência, por exemplo, do maior pico do sinal de vibração. Não seria ele mais representativo para a determinação do diâmetro do que a média do sinal ao longo da realização de todo o furo?
- 4) Estudos mais detalhados e aplicação de diferentes tipos de redes neurais ou redes híbridas também podem trazer vantagens aos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABKOWITZ, S.; BURKE, J. J.; HILTZ JR, R. H. **Technology of structural Titanium**. Princeton: D. Van Nostrand Company, 1995. p. 31-32.

ABU-MAHFOUZ, I. Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 7, p. 707-720, 2003.

AGOSTINHO, O. L., RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerância, ajuste, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

AGUIAR, P. R. et al. **Predicting surface roughness in grinding using neural networks: robotics, automation and control**. 1 ed. Vienna: I-Tech Education and Publishing KG, 2008, v. 1. p. 33-44.

BARTON, R.P.; THANGARAJ, A. R. A neural network approach to drilled hole quality monitoring based on machine spindle vibrations. **Transactions of NAMRI/SME**, p. 232–239, 1990.

BATTITI, R. First end second order methods for learning: between steepest descent and Newton's method. **Neural Computation**, v. 4, p. 141-166, 1992.

BATZER, S. A. et al. Chip morphology and hole surface texture in the drilling of cast Aluminum alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 79, p. 72-78, 1998.

BAYLY, P. V.; LAMAR, M. T.; CALVERT, S. G. Low-frequency regenerative vibration and the formation of lobed holes in drilling. **Transactions of the ASME** **124**, p. 275–566, 2002.

BHAUMIK, S.K., DIVAKAR C.; SINGH A. K.; Machining Ti-6Al-4V alloy with a wBN-cBN composite tool. **Material and design**, vol.16, p221-226 - Bangalore, India 1995.

EZUGWO, E.O.; WANG, Z.M.; Titanium alloys and their machinability. **Journal of Material Processing Technology**, v.68, p. 262-274, 1997.

BIANCHI, E. C. et al. The minimum quantity of lubricant (MQL) technique in surface grinding of steel. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRIBOLOGY AND DESIGN, III, 2010, Algarve. **Anais...** Algarve, 2010. No prelo.

BRAGA, D. U. et al. Minimal lubrication in the drilling process of aluminum-silicon alloy - A356 (SAE 323). In: International Machining & Grinding Conference, III, 1999, Cincinnati. **Anais...** Cincinnati, 1999.

BOEIRA, A. M. G. SCHROETER R. B., WEGENER K.; Modelagem e simulação das forças na furação com brocas helicoidais a partir de dados obtidos no torneamento de segmentos cilíndricos – Tese de Doutorado, 2010 – Universidade Federal de Santa Catarina.

CALLISTER JR., W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7. ed. Handcover: John Wiley, 2006. 832p.

CARVALHO, D. S.; ABRÃO, A. M.; RUBIO, J. C. C. Monitoramento da temperatura de usinagem. In: CONGRESSO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA, XI, 2004, Nova Friburgo. **Anais...** Nova Friburgo, 2004.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Fluidos de corte. In: _____. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber Editora, 2000. p. 165-179.

DOWLING, N. E. Fatigue of materials: introduction and stress-based approach. In: _____. **Mechanical behaviour of materials: engineering methods for deformation, fracture and fatigue**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall Int., 1999. p. 357-419.

DROZDA, T. J.; WICK, C. (Ed.). Milling. In: _____. **Tool and manufacturing engineers handbook: machining**. 4. ed. Michigan: SME, 1983. p. 10.1-10.76.

EL-WARDANY, G. D.; ELBESTAWI, M. A. Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis. **International Journal of Machine Tools Manufacturing**, v. 36, n. 6, p. 687-711, 1996.

FEDERAL AVIATION REGULATION. **Part 25: Airworthiness Standards Transport Category Airplanes**. Washington, 2002.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blücher, 2003.

FORESSE, F. D.; HAGAN, M. T. Gauss-Newton approximation to neural networks. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 1997. p. 1930-1935.

FUSSE, R. Y. et al. Erros geométricos na retificação do aço SAE HVN-3. **Revista Máquinas e Metais**, ano XL, n. 464, p. 150-163, 2004.

GOVINDHASAMY, J. et al. *Second-Order Training of Adaptive Critics for Online Process Control*. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, part B, v. 35, n. 2, p. 381-385, 2005.

GROOVER, M. P. **Automation production systems and computer integrated manufacturing**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall Int., 1987. 812 p.

GUIBERT, N.; PARIS, H.; RECH, J. A numerical simulator to predict the dynamical behavior of the self-vibratory drilling head. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, p. 644-655, 2008.

HAGAN, M. T.; MENHAJ, M. B. Training feedforward networks with Marquardt algorithm. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 5, p. 989-993, 1994.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HATCH, J. E. **Aluminum: properties and physical metallurgy**. Ohio: American Society for Metals Park, 1984. 424p.

HEINZ, A. et al. Recent development in aluminum alloys for aerospace applications. **Materials Science & Engineering**, v. A, n. 280, p. 102-107, 2000.

HUANG, B. P.; CHENB, J. C.; LI, Y. Artificial-neural-networks-based surface roughness Pokayoke system for end-milling operations. **Neurocomputing**, v. 71, p. 544–549, 2008.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2. ed. London: Edward Arnold, 1992. 284p.

JANTUNEN, E. A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling. **International Journal Machine Tools Manufacture**, v. 42, p.997–1010, 2002.

KALIDAS, S.; DEVOR, R. E.; KAPOOR, S. G. Experimental investigation of the effect of drilling coating on hole quality under dry and wet drilling conditions. **Surface and Coatings Technology**, v. 148, n. 2-3, p. 117-128, 2001.

KOLESNIKOV, B. Y.; HERBECK, L. Carbon fiber composite airplane fuselage: concept and analysis. **German Aerospace Center (DLR)**, Germany, 2004. Disponível em: <<http://www.dlr.de>>. Acesso em: 23 de janeiro de 2010.

KONIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: drehen, frasen, bohren**. 7. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2002. 409 p.

KOVACS, Z. L. **Redes neurais artificiais: fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 1996.

LIN, S. C.; TING, C. J. Drill wear monitoring using neural network. *International Journal of Machine Tools Manufacture*, v.36, p. 465-475, 1996.

LIU, Z. et al. Automated rivet detection in the EOL image for aircraft lap joints inspection. **NDT & E International**, v. 39, p. 441-448, 2006.

MELO, F. C. L.; DEL'ARCO, A. P. **Estudo prospectivo de novos materiais para o setor aeronáutico / espacial: situação no campo de nanomateriais**. Centro Técnico Aeroespacial: Instituto de Estudos Avançados, 2007. Disponível em: <<http://www.ieav.cta.br/nanoaeroespacial2007/pdf/Francisco%20C.L%20de%20Melo%20%20Estudo%20Prospectivo%20de%20Novos%20Materiais%20para%20o%20Setor%20Aeron%20E1uticoEspacial%20-%20.pdf>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2010.

MARCELINO, A. P. et al. Análise do comportamento das ferramentas de cerâmica a base de Si₃N₄ no processo de torneamento de ferro fundido cinzento. In: CONGRESSO REGIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, XI, 2004, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro, 2004.

MIRANDA, G. W. A. **Uma contribuição ao processo de furação sem fluido de corte com broca de metal duro revestida com TiAlN**. 2003. 160f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003.

NOORI-KHAJAVI, A.; KOMANDURI, R. Frequency and time domain analyses of sensor signals in drilling: investigation on some problems associated with sensor integration. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 35, n. 6, p. 795-815, 1995.

NORRIS, G. Feeling the heat. **Metal Bulletin Monthly**, v. 386, p. 36-39, 1994.

NORTON, R. L. **Machine design: an integrated approach**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall Int., 2005. 984p.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4. ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall, 2003. 800p.

OZEL, T.; KARPAT, Y. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, p. 467-479, 2005.

PANDA, S. S. et al. Drill wear monitoring using back propagation neural network. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, p. 283-290, 2006.

PRINCIPAIS propriedades físicas, mecânicas e térmicas do alumínio e do titânio. Disponível em: <<http://www.matweb.com>>. Acesso em: 23 de janeiro de 2010.

PIRTINI, M.; LAZOGLU, I. Forces and hole quality in drilling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n.11, p. 1271-1281, 2005.

RALPH, W. C. et al. Effect of various aircraft production drilling procedures on hole quality. **International Journal of Fatigue**, v. 28, p. 943-950, 2006.

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS. Disponível em <<http://www.icmc.usp.br/~andre/research/neural/>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2010.

REZENDE, M. C. Fractografia de compósitos estruturais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 17, n. 3, p. 4-11, 2007.

SANTOS, M. T.; ALMEIDA, A. R.; TU, C. C. Redes neurais artificiais aplicadas no monitoramento da condição de ferramentas de corte utilizando algoritmo de extração das características SFS. In: Proceedings of the Brazilian Conference on Neural Networks, IV, 1999, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos, 1999.

SCHROETER, R. B; WEINGAERTNER, W, L. Processos de usinagem e ferramentas de corte. Florianópolis: UFSC, 2001. 213 p. nível 1, vol. 2.

SECO, F. J.; IRISSARI, A. M. Creep failure mechanisms of a Ti-6Al-4V thick plate. **Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures**, v. 24, p. 741-742, 2001.

SICK, B. Online and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of research. **Mechanical System Signal Process**, v. 16, n. 4, p. 487-546, 2002.

SILVA, M. M.; MACHADO, A. R.; COSTA, E. R. **Estudo dos mecanismos de desgaste na usinagem com mínima quantidade de fluido de corte no processo de furação.** Disponível em: <www.ifm.org.br/fase1/media/congresso/texto/552>. Acesso em: 17 de agosto de 2010.

TAFNER, M. A. **Estagiamento automático do sono utilizando um canal de EEG e uma rede neural artificial com alta representação cortical.** 1999. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

TAFNER, M. A. O que são as redes neurais artificiais. **Revista Cérebro e Mente**, v. 2, n. 5, 1998. Disponível em: <<http://www.cerebromente.org.br>>. Acesso em: 09 de agosto de 2009.

WEINGAERTNER, W. L. et al. Qualidade superficial e formação de cavacos na usinagem de Al e Cu. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n. 5, p.82-89, 1994.

ANEXO 1 – COMPORTAMENTO DIÂMETRAL DAS AMOSTRAS ENSAIADAS

Os gráficos mostrados na Figura 51 à Figura 59 mostram o comportamento do diâmetro ao longo de cada uma das amostras para cada condição de corte testada.

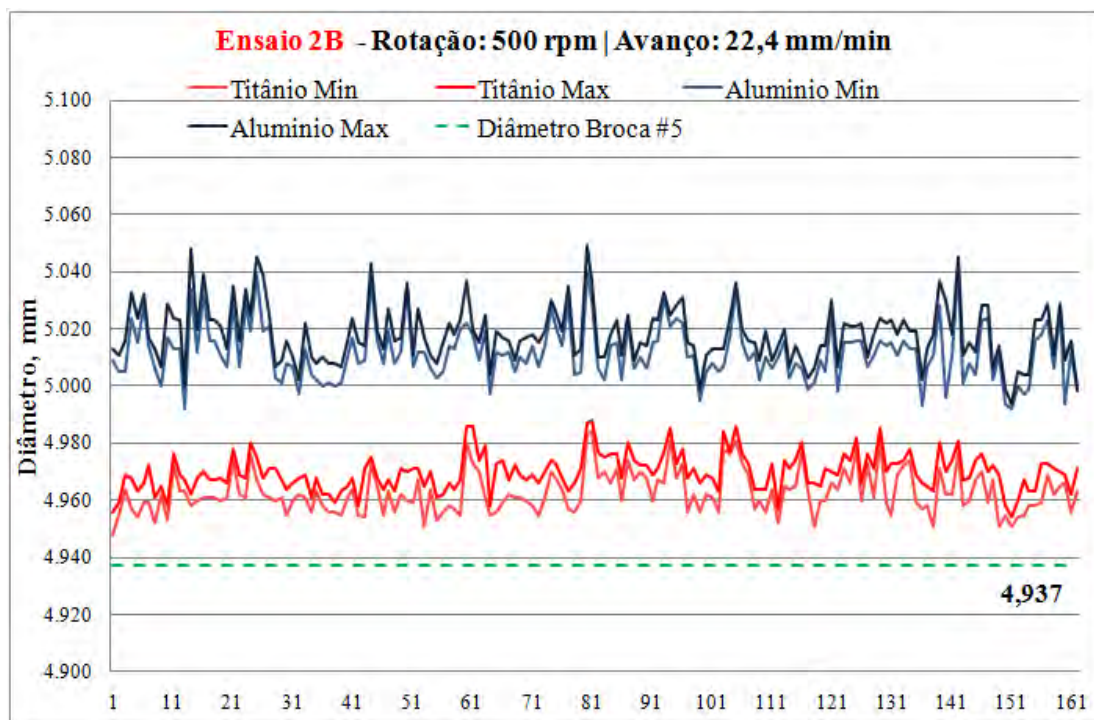


Figura 51. Variação do diâmetro do furo (500 rpm | 22,4 mm/min)

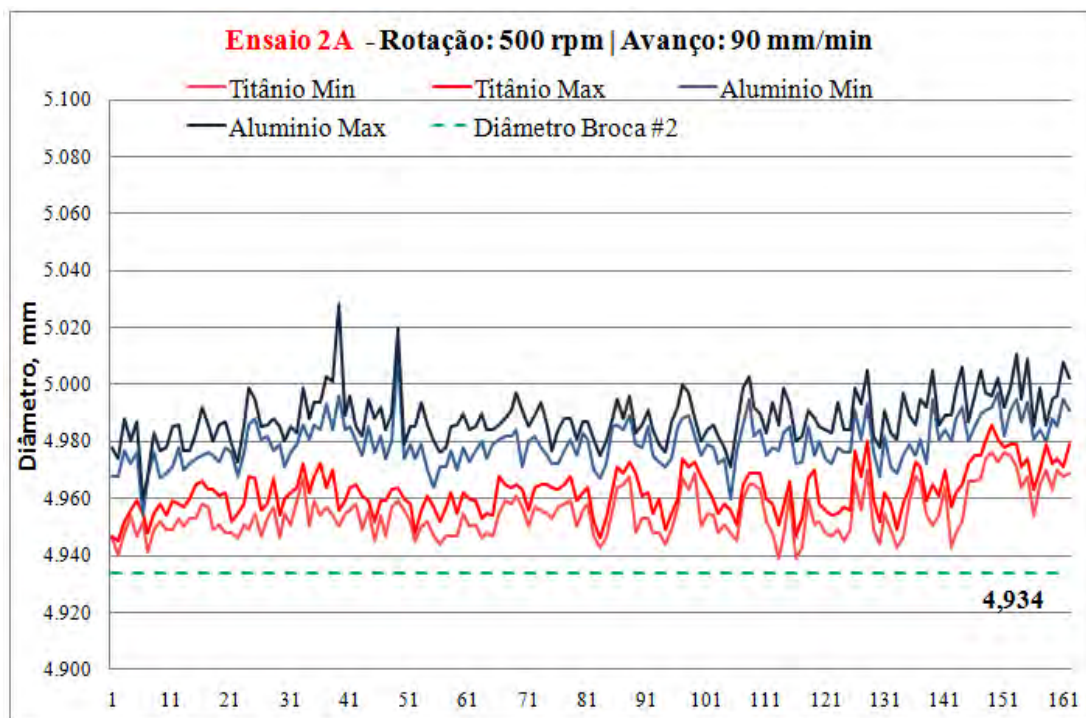


Figura 52. Variação do diâmetro do furo (500 rpm | 90 mm/min)

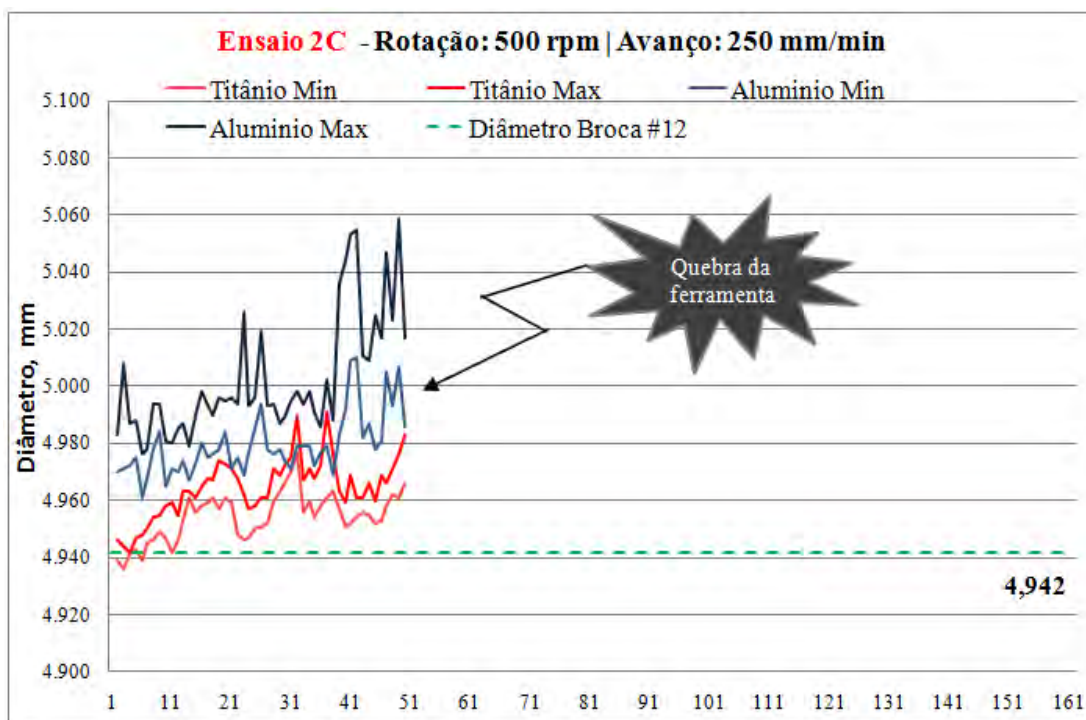


Figura 53. Variação do diâmetro do furo (500 rpm | 250 mm/min)

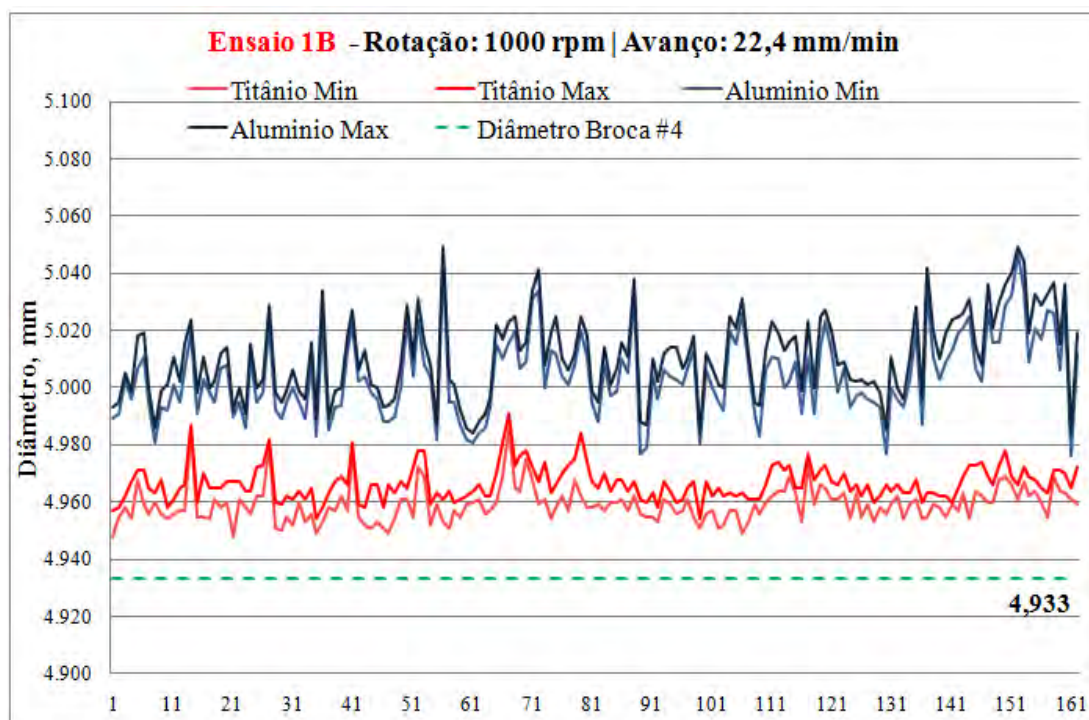


Figura 54. Variação do diâmetro do furo (1000 rpm | 22,4 mm/min)

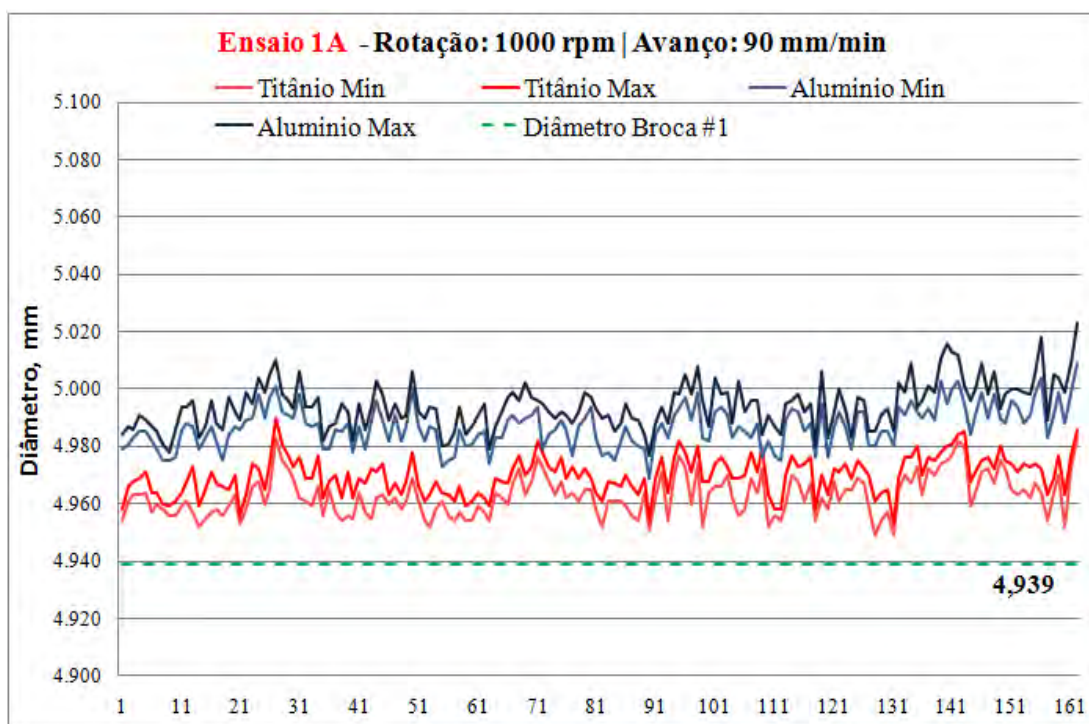


Figura 55. Variação do diâmetro do furo (1000 rpm | 90 mm/min)

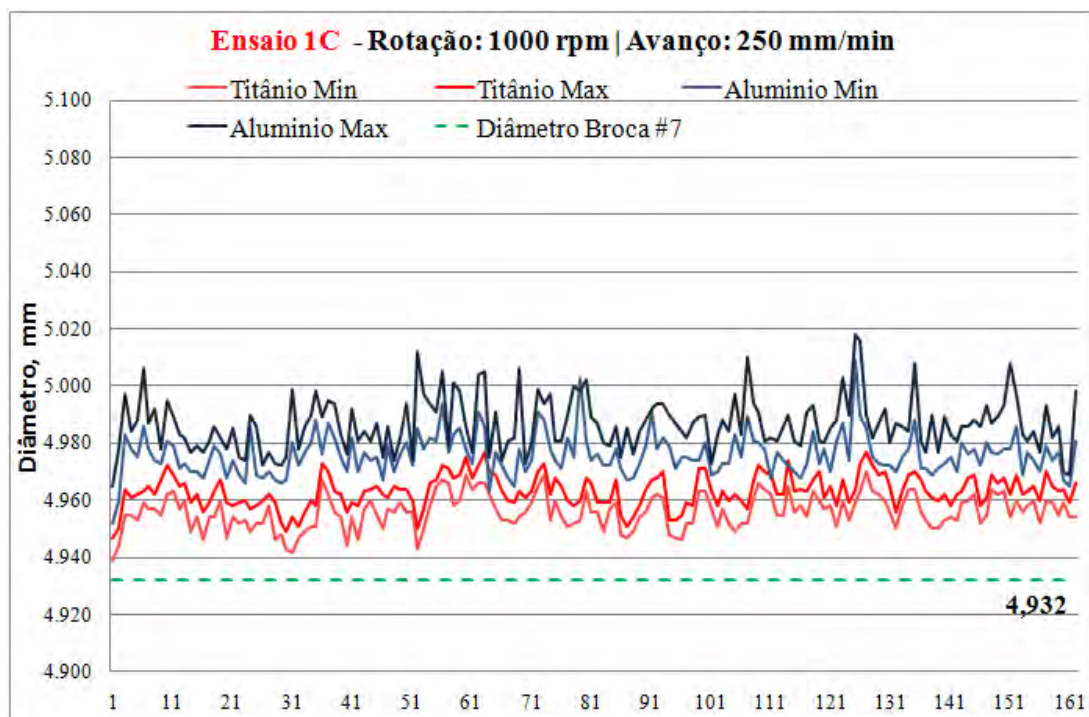


Figura 56. Variação do diâmetro do furo (1000 rpm | 250 mm/min)

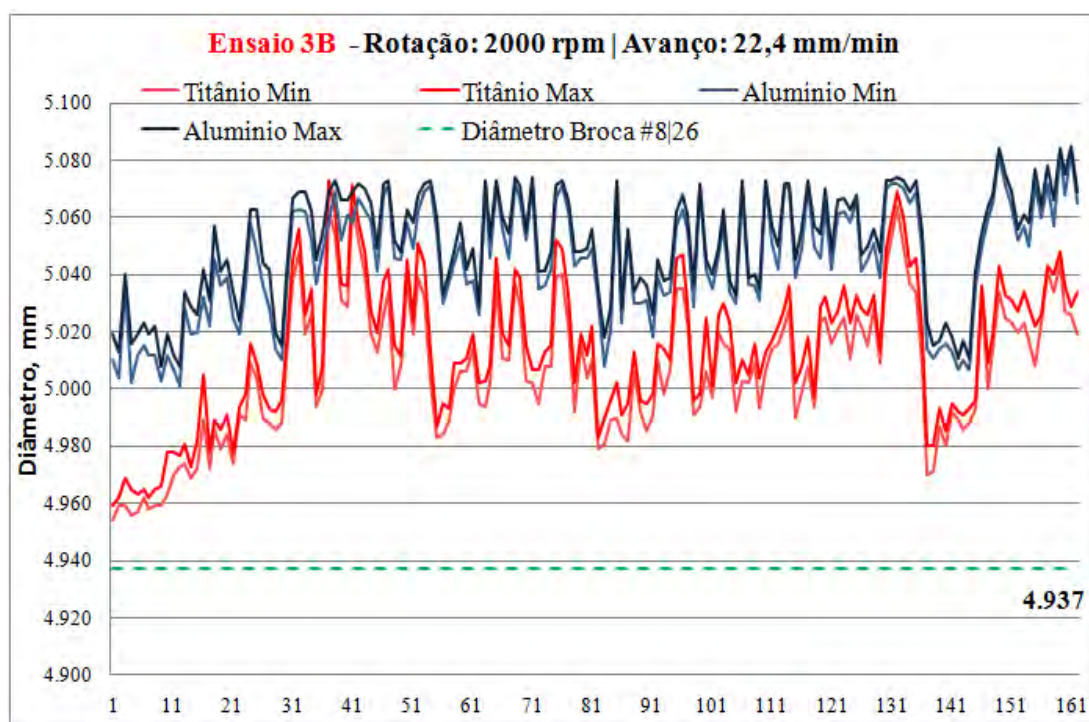


Figura 57. Variação do diâmetro do furo (2000 rpm | 22,4 mm/min)

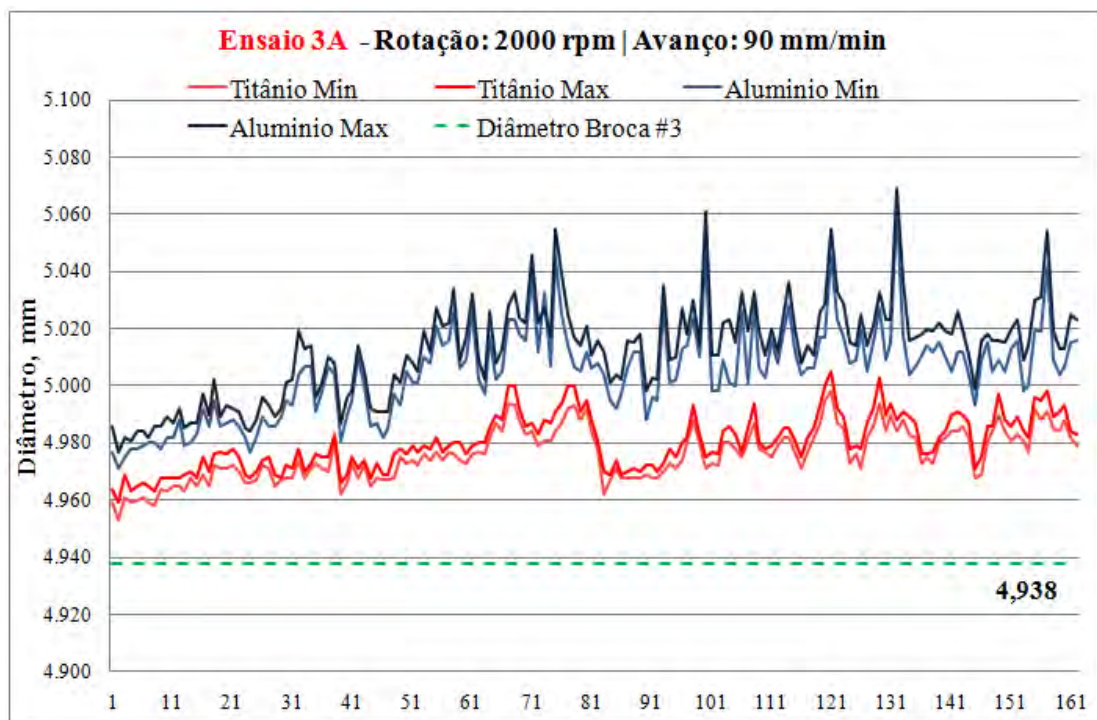


Figura 58. Variação do diâmetro do furo (2000 rpm | 90 mm/min)

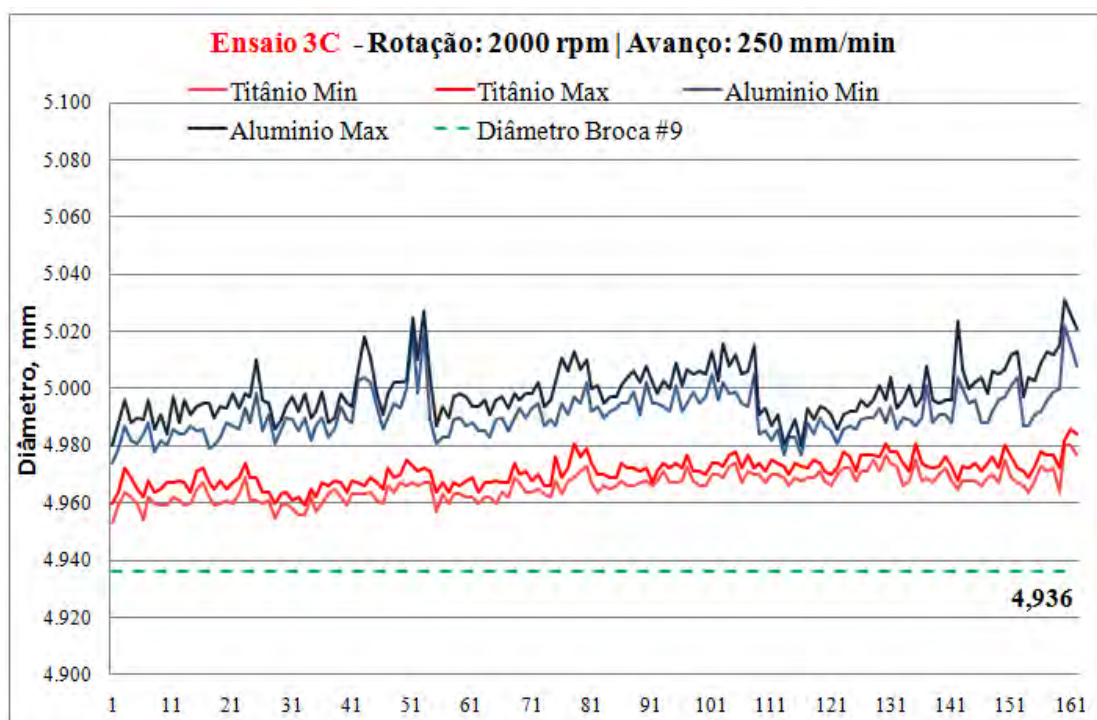


Figura 59. Variação do diâmetro do furo (2000 rpm | 250 mm/min)

ANEXO 2 – COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE NAS AMOSTRAS ENSAIADAS

Os gráficos mostrados na Figura 60 à Figura 68 mostram o comportamento da rugosidade média aritmética (Ra) ao longo de cada uma das amostras para cada condição de corte testada.

Devido à complexidade e ao elevado tempo de cada medição, foi medido um (1) furo a cada nove (9) realizados, sendo que os furos intermediários entre esses tiveram seu valor de Ra estimado por uma regressão linear dos valores encontrados entre um furo e outro.

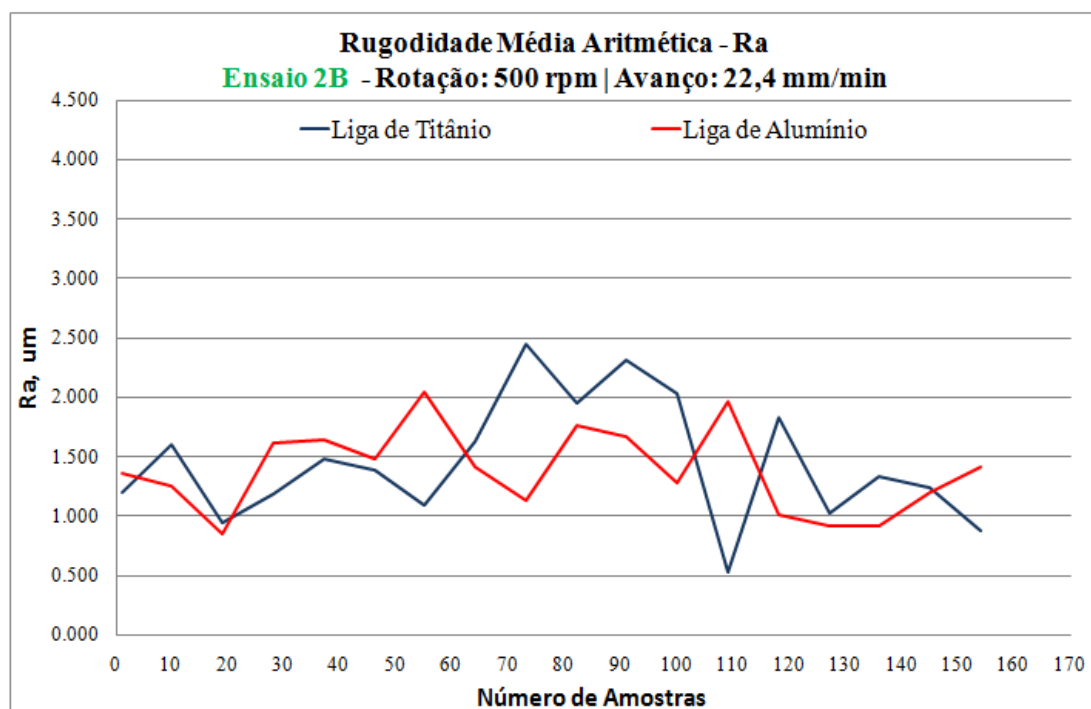


Figura 60. Variação da rugosidade - Ra (500 rpm | 22,4 mm/min)

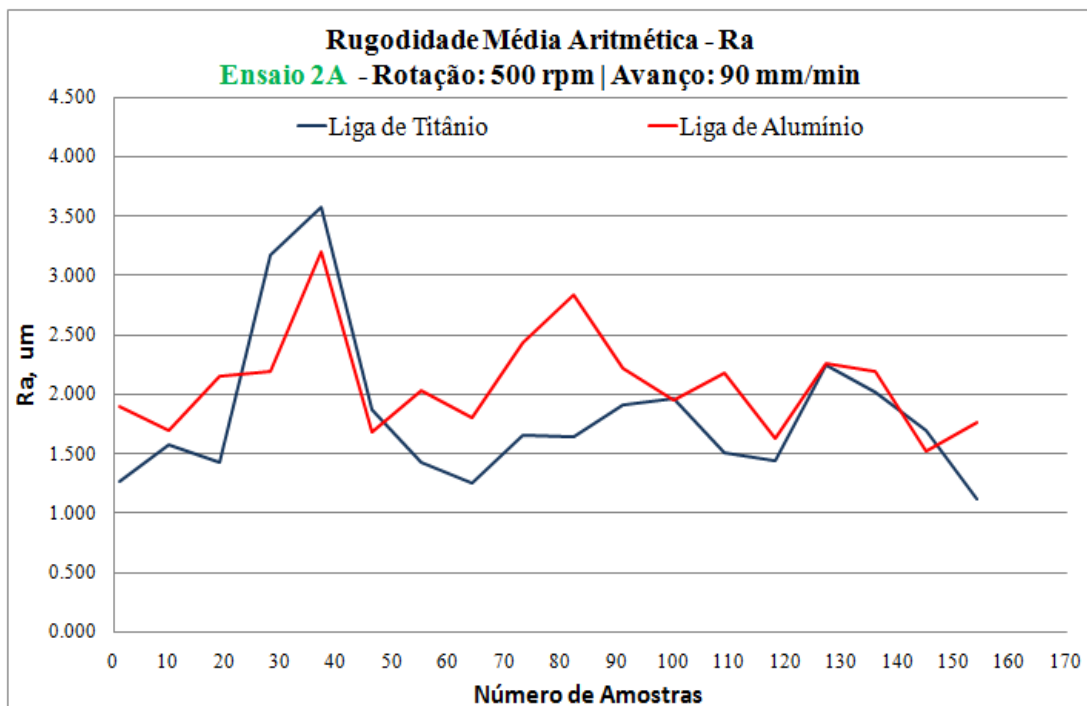


Figura 61. Variação da rugosidade - Ra (500 rpm | 90 mm/min)

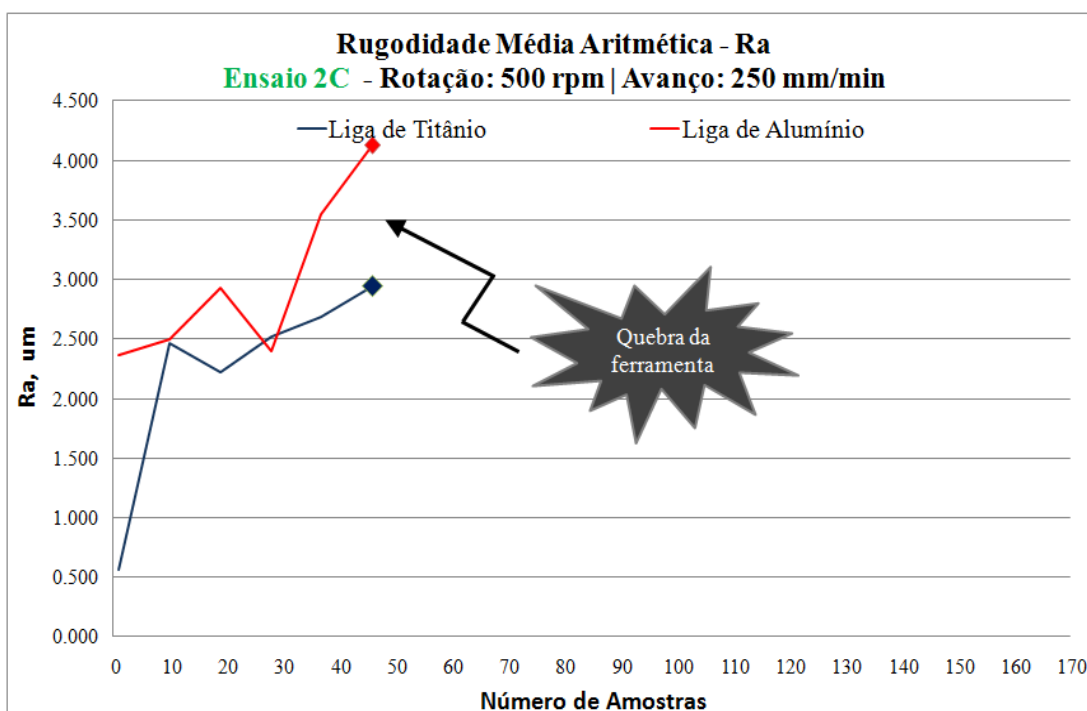


Figura 62. Variação da rugosidade - Ra (500 rpm | 250 mm/min)

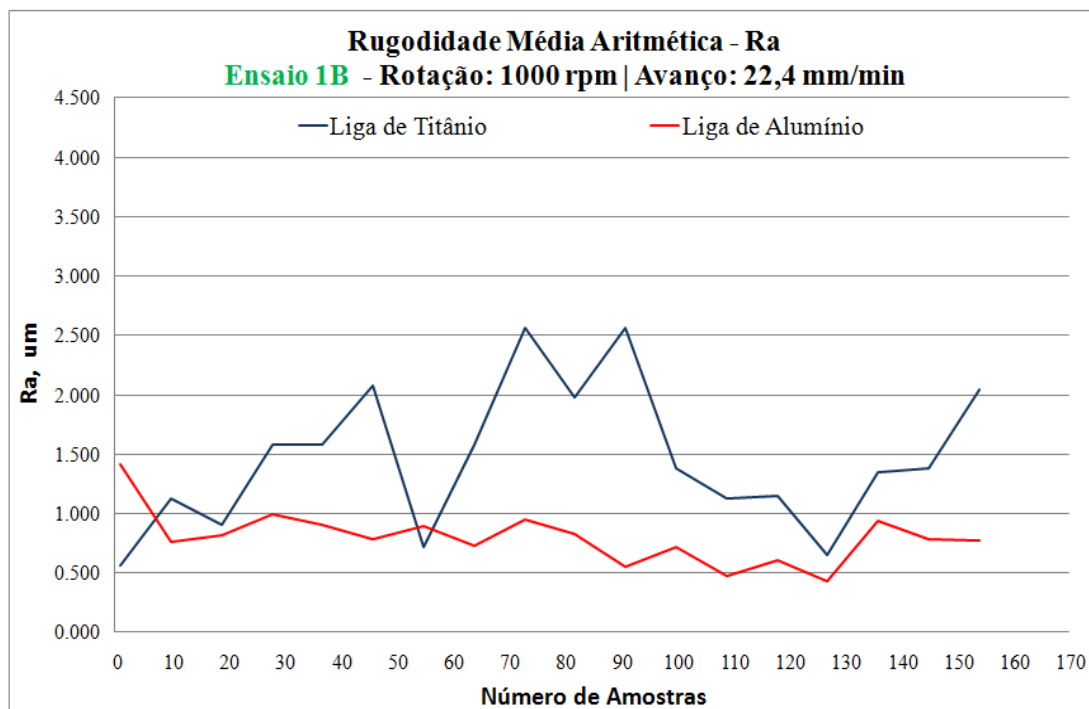


Figura 63. Variação da rugosidade - Ra (1000 rpm | 22,4 mm/min)

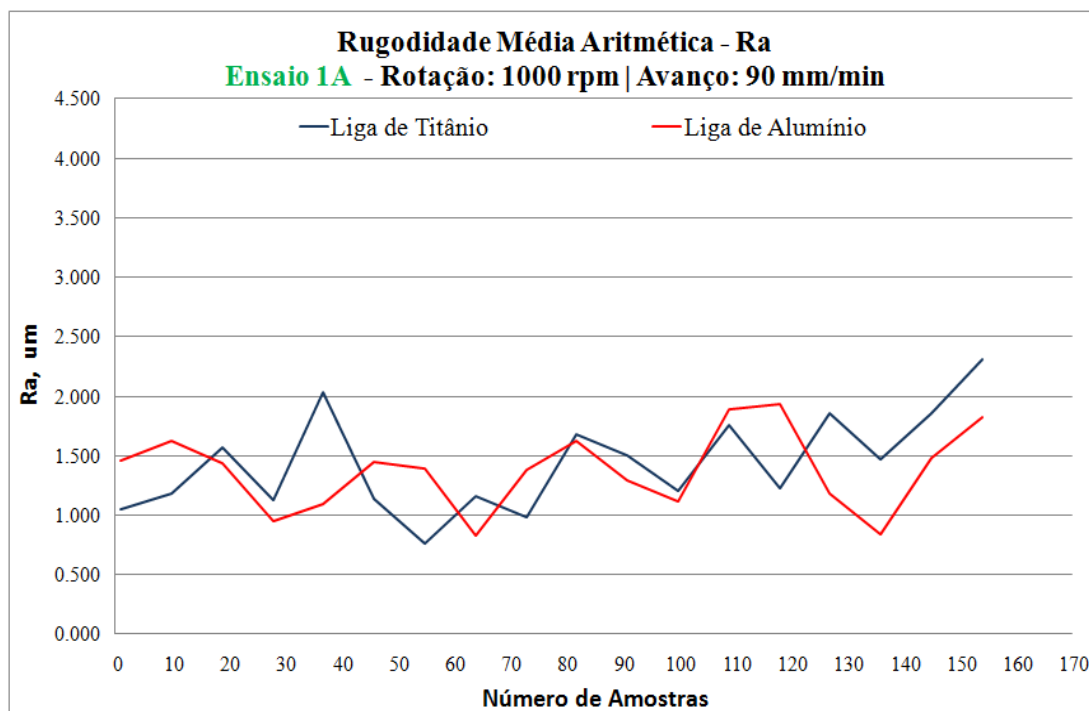


Figura 64. Variação da rugosidade - Ra (1000 rpm | 90 mm/min)

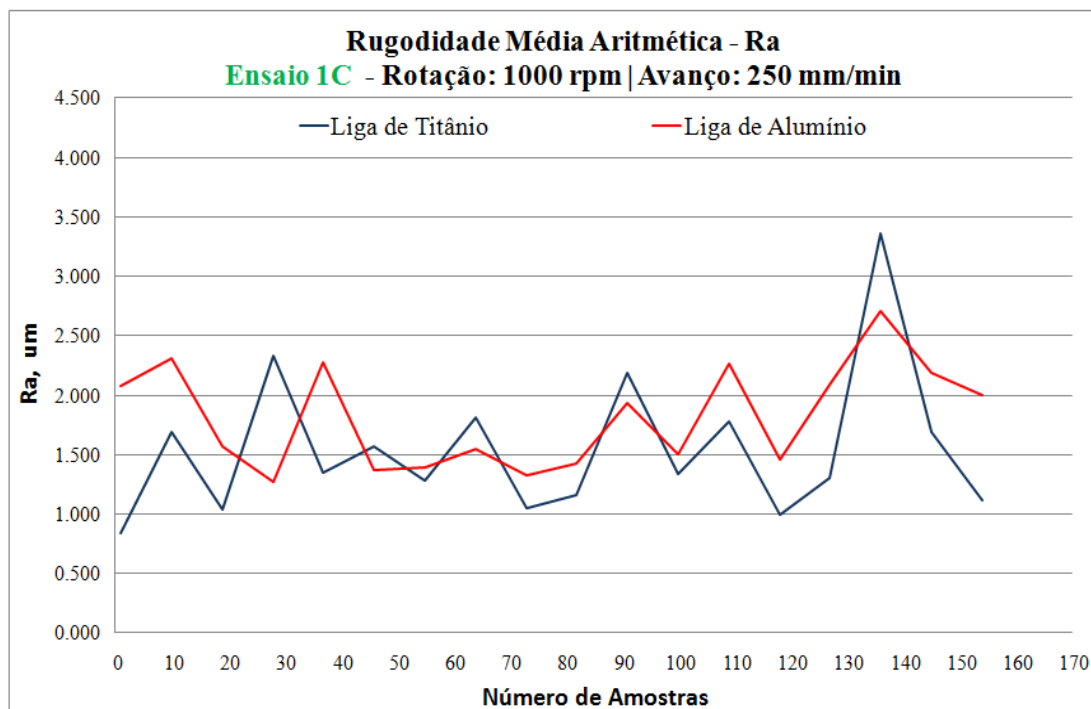


Figura 65. Variação da rugosidade - Ra (1000 rpm | 250 mm/min)

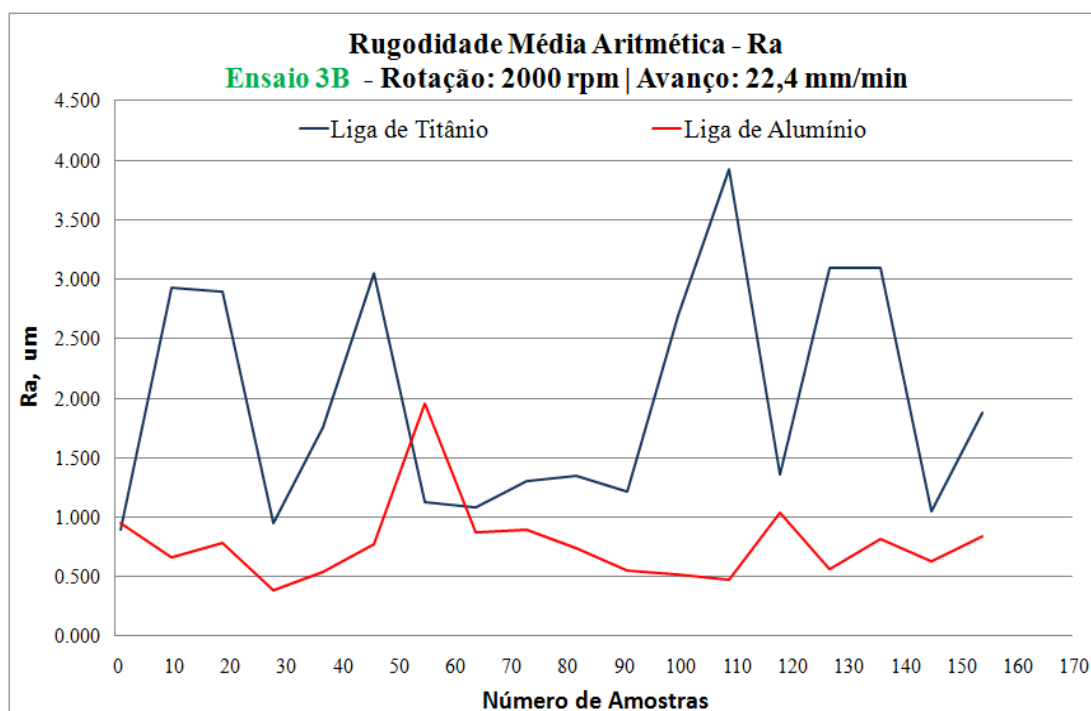


Figura 66. Variação da rugosidade - Ra (2000 rpm | 22,4 mm/min)

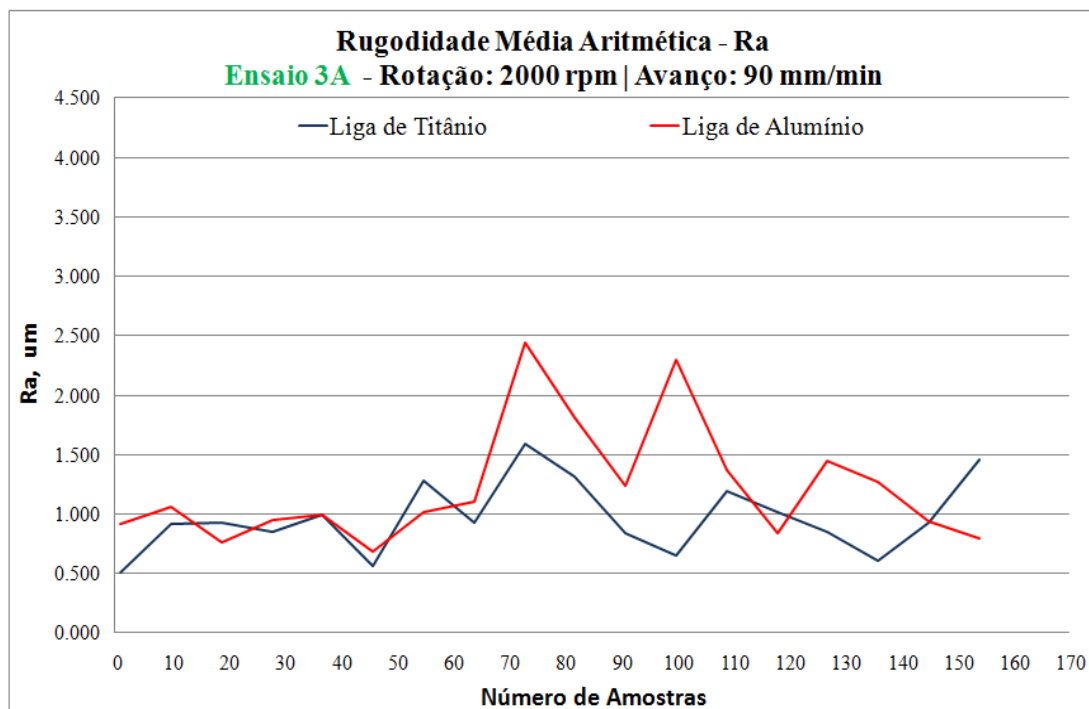


Figura 67. Variação da rugosidade - Ra (2000 rpm | 90 mm/min)

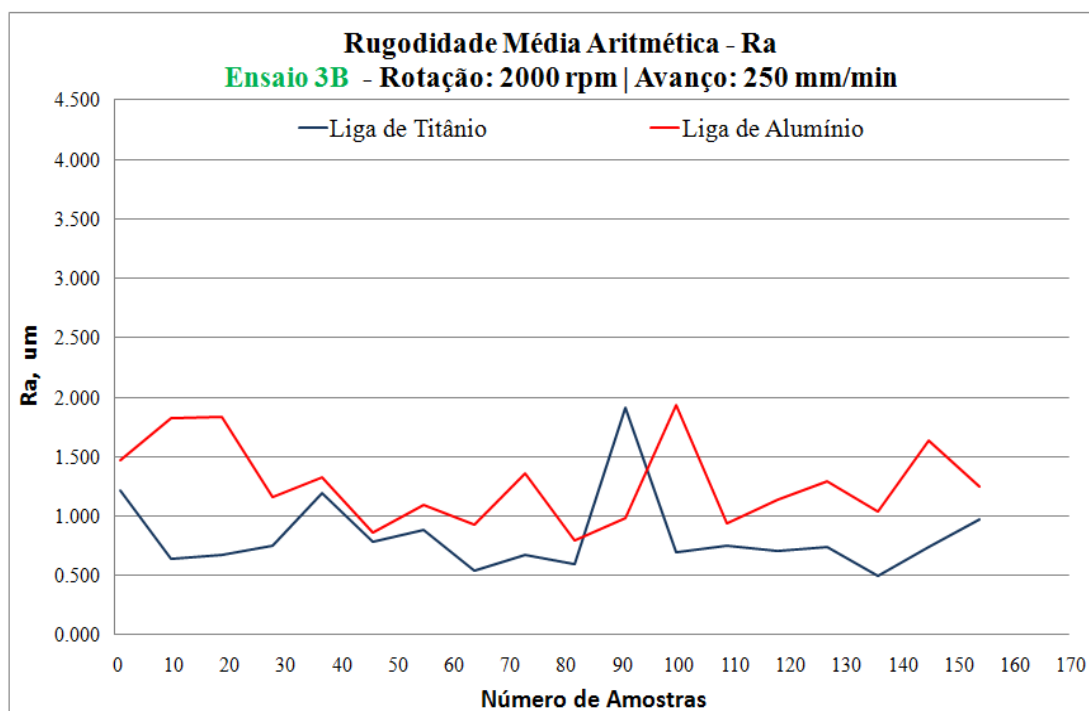


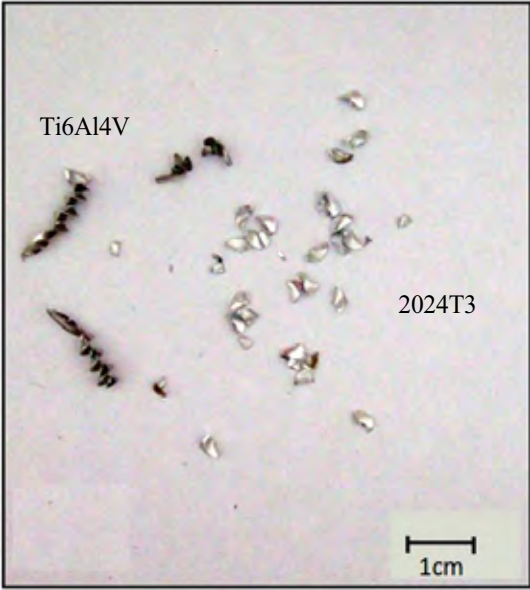
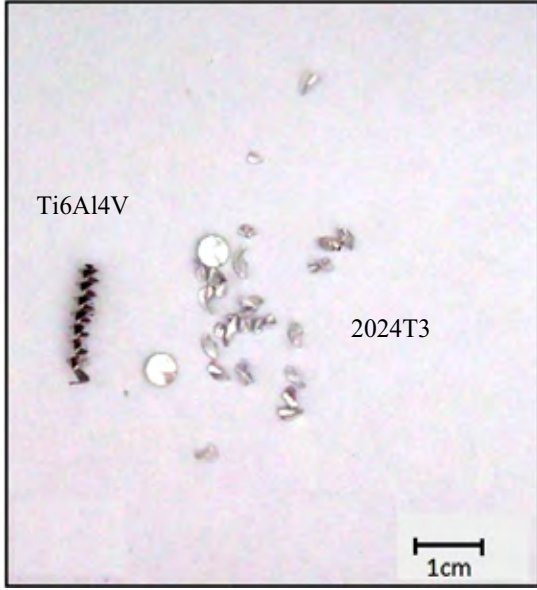
Figura 68. Variação da rugosidade - Ra (2000 rpm | 250 mm/min)

ANEXO 3 – CAVACOS COLETADOS DURANTE OS ENSAIOS

As figuras abaixo apresentam os cavacos coletados durante os ensaios para cada condição de corte testada. À esquerda das figuras são mostrados os cavacos da liga de Titânio (Ti6Al4V). À direita apresentam-se os cavacos da liga 2024T3.

	
Rotação: 500 rpm Velocidade de Avanço: 22,4 mm/min	Rotação: 500 rpm Velocidade de Avanço: 90 mm/min
	
Rotação: 500 rpm Velocidade de Avanço: 250 mm/min	
Figura 69. Cavacos gerados com a rotação de 500 rpm	

	
Rotação: 1000 rpm Velocidade de Avanço: 250 mm/min	Rotação: 1000 rpm Velocidade de Avanço: 90 mm/min
	
Rotação: 1000 rpm Velocidade de Avanço: 22,4 mm/min	
Figura 70. Cavacos gerados com a rotação de 1000 rpm	

	
Rotação: 500 rpm Velocidade de Avanço: 250 mm/min	Rotação: 500 rpm Velocidade de Avanço: 90 mm/min
	
Rotação: 500 rpm Velocidade de Avanço: 22,4 mm/min	
Figura 71. Cavacos gerados com a rotação de 2000 rpm	