

UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE MULTI SENSORES E REDES NEURAS ARTIFICIAIS EM UM PROCESSO DE FURAÇÃO PARA ESTIMAÇÃO DO DIÂMETRO DOS FUROS

Carlos Eduardo Dorigatti Cruz, carlosdorigatti@yahoo.com.br¹
Paulo Roberto de Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br¹
João Gabriel Contrucci, juaogonzo@hotmail.com¹
Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br²
Luiz Eduardo de Ângelo Sanchez, sanchez@feb.unesp.br²
Arthur Alves Fiocchi, aafiocchi@yahoo.com.br²

¹Universidade Estadual Paulista-UNESP- Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Elétrica.
Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, s/n, Cx. Postal 473 - Cep. 17033-360, Bauru - SP

²Universidade Estadual Paulista-UNESP- Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Mecânica.
Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, s/n, Cx. Postal 473 - Cep. 17033-360, Bauru - SP

Resumo: *A crescente competitividade do mercado, exigência por qualidade e 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. Nas últimas duas décadas, técnicas que empregam sensores e inteligência artificial foram utilizados com sucesso no controle de variáveis dos mais diversos processos e usinagem. Na furação estas técnicas foram empregadas no monitoramento do desgaste da ferramenta de corte, obtendo como principal benefício, a redução de tempos de máquina parada, retrabalhos e descarte de peças em campos industriais. 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, se não inexistentes. Desta forma, este estudo foi conduzido buscando gerar uma contribuição à supervisão do processo de furação com foco na estimação do diâmetro do furo usinado. Utilizando um sistema de multi-sensores instalados em uma máquina ferramenta buscou-se estimar o diâmetro dos furos em um processo com broca helicoidal de metal duro e realizado em um pacote composto de uma liga de titânio seguido de uma liga de alumínio. Os sinais coletados durante o processo foram registrados e posteriormente serviram de entrada a uma rede neural artificial. Os resultados mostraram alta capacidade da rede em determinar o diâmetro do furo em 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: *Furação, Diâmetro, Redes Neurais Artificiais,, Sistemas Multi-sensores.*

1. INTRODUÇÃO

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

Contudo, apenas robôs, não são suficientes para assegurar a qualidade de operações de usinagem não assistidas devido a alterações em variáveis que não são lidas e controladas. (Abu-Mahfouz, 2003)

Dentre os processos de usinagem, a furação é um dos mais comuns e vastamente utilizadas em indústrias, onde se destaca os ramos: aeronáutico, automobilístico, fabricação de moldes e estampos, indústria médica e eletrônica.

Devido ao constante crescimento da competitividade, a redução de ciclos no processo é constantemente buscada. Contudo, junto a ela, também cresce a necessidade por tolerâncias geométricas cada vez mais apertadas e que devem ser obedecidas nos ambientes industriais. (Pirtini & Lazoglu, 2005)

Furação de precisão é um processo onde apertadas tolerâncias e bom acabamento superficial é exigido (Everson & Cheraghi, 1999). 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 trata 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 trás 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 do 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 importantes variações 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 prever 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 estimar o diâmetro de furos usinados em um pacote composto de uma liga de titânio (Ti6Al4V) sobre uma liga de alumínio (2024T3) utilizando como ferramenta uma broca helicoidal de metal duro. Para tanto um sistema de multi-sensores, equipado com um acelerômetro, sensor de corrente, tipo efeito Hall, sensor de emissão acústica e dinamômetro tri-dimensional foram utilizados. Esses sinais foram coletados a uma alta taxa de aquisição durante o processo de furação modelado com diferentes velocidades de corte e avanço. Estes dados serviram como entrada a uma rede Neural Artificial que após treinamento se capacitou a determinar os diâmetros partindo dos sinais de entrada.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Variáveis do processo de furação

O primeiro passo no desenvolvimento de qualquer processo de usinagem em um ambiente industrial é encontrar a correta combinação de parâmetros, interação entre ferramenta de corte, máquina ferramenta e condições de usinagem que permitam cumprir os requisitos especificados em projeto ou norma. Em um segundo passo, parâmetros, ferramenta e máquina são melhores estudados e otimizados, se possível, a fim de obter redução de custos e robustez de processo.

Inúmeras variáveis são capazes de afetar os resultados do processo de furação. A Fig. (1) mostra um diagrama de Ishikawa que resume as mais relevantes variáveis de um processo convencional de furação de acordo com a revisão literária que segue. As variáveis mostradas na Fig. (1) têm uma complexa interação entre si e determinar a combinação ótima entre elas é geralmente uma tarefa difícil. A revisão literária que segue aborda importantes aspectos relacionados a estas variáveis, priorizando aquelas de difícil controle, como o desgaste da ferramenta.

3.2. Parâmetros de Corte

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)

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 a rugosidade da parede do furo. (Worthington & Rahman, 1979).

O aumento da temperatura do processo, principalmente na usinagem de materiais de baixo ponto de fusão causa a formação de arestas postizas de corte que produzem furos alargados e de baixa qualidade superficial. Este efeito é piorado em processos onde a presença de fluido refrigerante é pequena ou nula. A presença de do fluido de corte tende a diminuir o tamanho dos cavacos, pois esfriam o material cortado reduzindo assim sua ductilidade, o que favorece a quebra, ou lubrificam os canais de escoamento do cavaco favorecendo sua saída. (Batzer et al., 1998).

Avanço e velocidade de corte, uma vez determinados, são assumidos como constantes em um processo industrial devido às precisões existentes nas máquinas CNC atuais. 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.

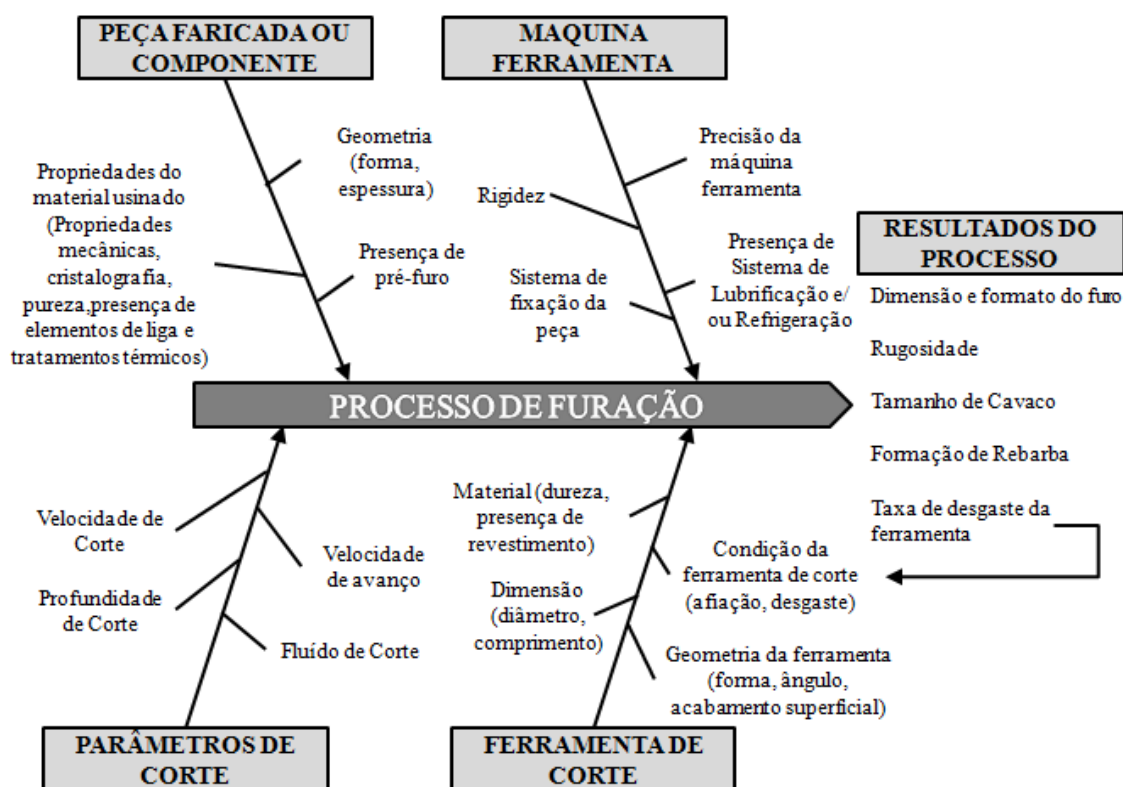


Figura 1. Variáveis de um processo furação convencional.

De acordo com Batzer et al. (1998) o avanço é entre todos os parâmetros controláveis, aquele que mais influência no tamanho do cavaco. Quanto o avanço cresce, aumenta também o quanto a ferramenta de corte penetra na peça e com isso aumenta a espessura do cavaco gerado conduzindo a uma porção maior de material com maior dificuldade de deformação dificultando 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 a citado aumento de torque, o que afeta diretamente o diâmetro do furo usinado.

3.3. Ferramenta de Corte

As brocas utilizadas para furação geralmente apresentam complexa geometria helicoidal e têm relativa flexibilidade ao longo de seu eixo. Uma ferramenta convencional possibilita inúmeras variações de projeto, com alterações expressivas nos ângulos de ponta, aresta de corte, ângulos de folga, saída e hélice. (Ralph et al., 2006). Somadas a isto, acrescenta-se a interferência dos materiais utilizados, tanto na ferramenta quanto da peça usinada e a rigidez da máquina ferramenta. A combinação destas variáveis resulta em alterações nas forças de usinagem que são causadoras dos principais problemas relacionados à falta de qualidade do processo, como erros de forma, rugosidade elevada, vibrações e desgaste excessivo da ferramenta. (Pirtini & Lazoglu, 2005)

Não bastasse a já complexa interação entre a geometria da ferramenta e a 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 devido ao desgaste ou lascamento. Um efetivo sistema de monitoramento de desgaste da ferramenta é capaz de reduzir os tempos de parada de máquina associados à quebra da ferramenta e reduzir custos de produção devido a danos causados na peça e retrabalhos. (Abu-Mahfouz, 2003; Noori-Khajavi & Komanduri, 1995)

O desgaste na broca é caracterizado por: desgaste de flanco, desgaste de face, desgaste de aresta e crateração ou lascamento (Panda et al., 2006). De acordo com Abu-Mahfouz, (2003) na maior parte das pesquisas que buscam o monitoramento do desgaste da ferramenta apenas o desgaste de flanco é mensurado e avaliado, 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, os 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.

O desgaste da ferramenta leva a alterações na ferramenta que causam um desbalanceamento nas forças de corte, e conseqüentemente mais vibração e impactos com a parede do furo. (Abu-Mahfouz, 2003; Jantunen, 2002). Abu-Mahfouz (2003) afirma que a detecção do desgaste da ferramenta de corte é o primeiro passo a um sistema de monitoramento de processo, pois afeta a capacidade de corte do sistema influenciando em todos os seus resultados como diâmetro e circularidade dos furos, rugosidade, formação de rebarbas e centralização.

3.4. Máquina Ferramenta e peça usinada

Este trabalho não objetiva discutir a influência do material usinado, geometria da peça fabricada ou projeto de máquinas ferramentas. É importante, contudo, observar que muitos problemas em no monitoramento e controle provêm de fatores, como heterogeneidade de materiais usinados, tipo de máquinas empregadas, ressaltando sua rigidez, sistema de fixação da peça, tipo de mandril utilizado e material da ferramenta, além de sua manutenção. (Guiberta et al, 2008)

Alterações na peça usinada também podem afetar significativamente o processo, e a arquitetura do sistema de controle e monitoramento. Como exemplo disso pode-se citar a presença de furos guias no processo. 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 redução de material removido pela aresta primária da ferramenta e pelo caminho gerado pelo guia, sendo que, na maioria dos casos, a presença de furo guia melhora a rugosidade dos furos.

Todos esses fatores devem ser considerados na aplicação de um sistema de supervisão e controle de aplicação industrial. Quanto maior o número de variações possíveis, maior também a complexidade do controle.

3.5. Utilização de sensores no controle de processos de usinagem

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. 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 (Guiberta et al., 2008; Ozel & Karpat, 2005; 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 estimados 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. 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; Aguiar et al., 2008).

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 e os resultados obtidos 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. Na furação podem-se distinguir dois diferentes tipos de vibração, as de baixa frequência, e de altas frequências. Geralmente, as baixas frequências são mais significativas, pois está associada diretamente a qualidade do furo. (Guiberta et al., 2008)

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

A vantagem de sensores EA é sua alta acuraria em ler alguns fenômenos, como a energia dissipada durante a retração elástica dos materiais após a ruptura da porção cortada.

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.

3.6. Redes Neurais Artificiais (RNA) aplicadas ao monitoramento de processos de usinagem

Redes Neurais Artificiais são sistemas inspirados na arquitetura do cérebro humano, e apresentam grande capacidade no reconhecimento de padrões e modelamento de sistemas altamente não lineares (Noori-Khajavi & Komanduri, 1995).

A motivação por trás da aplicação de 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 está gasta ou há algo de errado no processo. É certo que um operador não pode assegurar a qualidade do processo (rugosidade, diâmetro do furo) sem que faça uma medição, porém, a observação da cor e tamanho do cavaco, presença de fumaça ou incandescência da ferramenta pode auxiliá-lo na detecção de um possível problema. Os ruídos são outra 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 a sociedade de estudo da manufatura devido a toda a complexidade anteriormente descrita e, 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 et al, (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 *back propagation* são simples, robustas e de boa eficiência para sistemas não lineares (Bayly et al., 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 RNA 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 os 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.

4. MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

Os corpos de prova utilizados nestes trabalhos eram compostos por um chapa de 2mm de uma liga de titânio (Ti6Al4V) sobreposta sobre uma chapa de 3mm de uma liga de alumínio (2024T3). Estes materiais, dimensões e constituição do pacote foram escolhidas por se tratarem de materiais largamente utilizados na fabricação de aeronaves e comumente processados nas condições escolhidas.

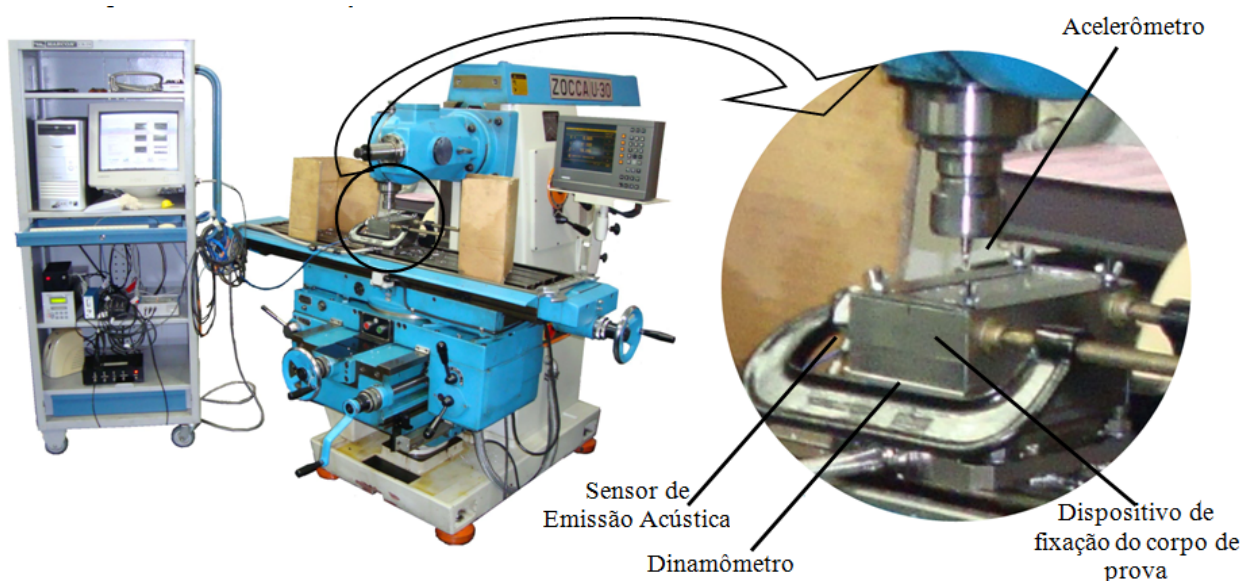


Figura 2. Máquina e equipamentos utilizados para realização dos ensaios e aquisição dos dados.

Os ensaios deste trabalho foram realizados com a utilização de uma máquina fresadora da marca Zocca, modelo U-30 equipada com um dispositivo especial para fixação dos corpos de prova. Sobre a mesa da máquina foi montado o dinamômetro e sobre ele este, o dispositivo de fixação dos corpos de prova e que ainda recebeu os sensores de vibração e emissão acústica mostrados na Fig. (2). Para garantir que não houvesse separação das chapas ou infiltração de limalhas durante o corte, o dispositivo de fixação dos corpos de prova continha uma chapa superior parafusada de forma a prender as chapas por pressão em seus contornos.

Três rotações (500, 1000 e 2000 rpm) e três velocidades de avanço (22,4, 90 e 250 mm/min) foram utilizadas combinadas duas a duas, totalizando nove condições de usinagem testadas. Os parâmetros escolhidos foram definidos durante ensaios preliminares respeitando as restrições da máquina utilizada e buscando gerar condições variadas de corte para conhecer a capacidade da rede em condições diversas.

Para cada uma das nove condições de usinagem foi utilizada uma broca nova, todas de igual geometria e fabricadas no mesmo padrão utilizados por empresas do ramo aeronáutico. No total foram realizados 1468 furos divididos em 54 corpos de prova com 27 furos cada (6 corpos de prova por condição de usinagem testada).

O sensor de força foi instalado sobre a mesa da máquina ferramenta e sob o dispositivo de fixação dos corpos de prova. Utilizando grampos, os sensores de vibração de emissão acústica foram acoplados a este dispositivo. Estes sistemas somados ao sensor de corrente instalado no circuito elétrico da máquina foram ligados a um centro de aquisição de dados equipado com um micro-computador, amplificadores e filtros de cada um dos sensores.

Com a ajuda de um software desenvolvido no LabView os sinais foram lidos e armazenados durante cada ciclo de furação. Os sinais coletados apresentavam como padrão uma região inicial e final de inatividade, referentes ao tempo de avanço e retorno do cabeçote anterior ao toque da ferramenta e posterior sua saída da peça. Utilizando rotinas computacionais, estas regiões do ensaio foram expurgadas. A Fig. (3) mostra a leitura dos 6 sinais na região efetiva de corte, bem como a direção dos eixos considerados e a constituição do corpo de prova.

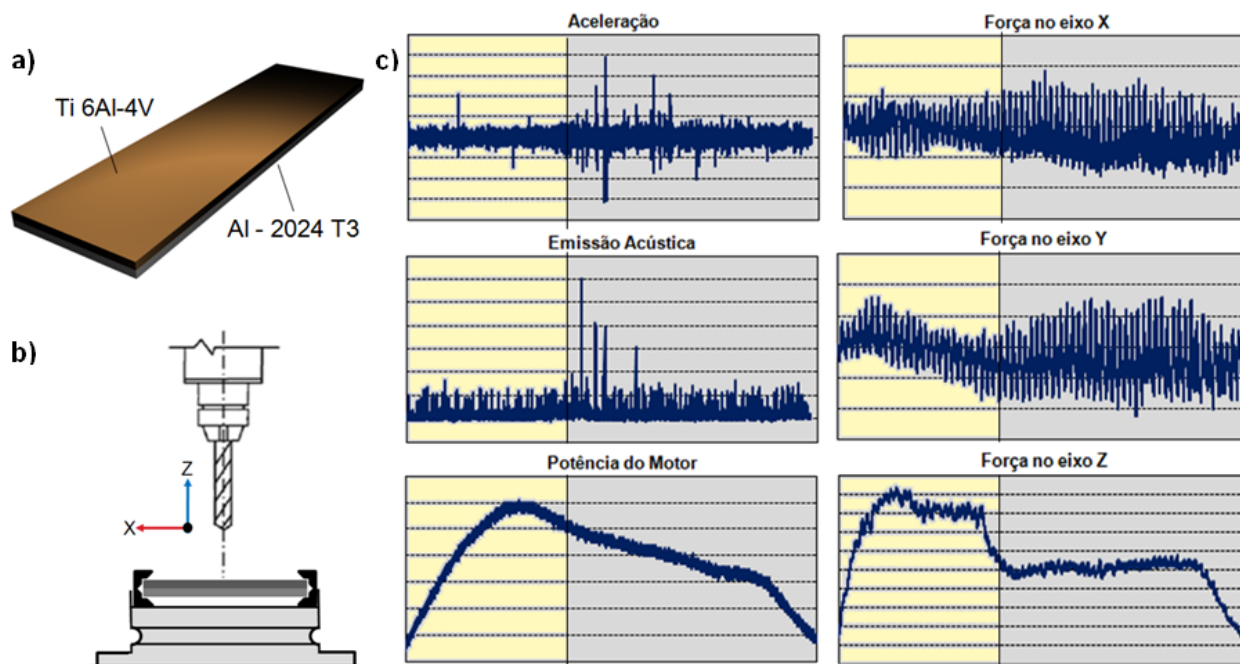


Figura 3. Em (a) corpo de prova, em (b) eixo de coordenadas adotado e em (c) sinais coletados para uma amostra.

Os sinais foram divididos para a parte referente à furação da chapa da liga de titânio e alumínio mostrados em trechos de diferentes cores da Fig. (3c). Destas regiões, foi calculada a média dos valores absolutos dos sinais e esses valores foram utilizados juntos aos parâmetros de corte como entrada da rede neural artificial.

Para obter os dados de treinamento, validação e teste das redes o diâmetro de cada furo foi medido. Apesar de perfurados juntos, devido às propriedades de cada material e a constituição física do corpo de prova, os furos gerados têm diferentes diâmetros para a mesma amostra. Assim, todos os furos tiveram sua medida realizada em sua entrada (Ti6Al4V) e saída (2024T3). Para tanto, foi utilizado um relógio comparador da marca Mahr equipado com uma ogiva que permite realizar a medida de diâmetros.

Além das diferenças entre materiais, sabe-se que todo furo é oval, resultado de diferenças de rigidez nos diferentes sentidos da máquina, corte desbalanceado da ferramenta, etc. Desta forma, utilizando a função min/max do relógio comparador foi medido diâmetro máximo e mínimo de cada furo e de cada material através da rotação do aparelho no interior do furo. Assim, cada furo apresentou um total de quatro diâmetros.

A Fig. (4) mostra a arquitetura das redes neurais artificiais com entradas e saídas utilizadas.

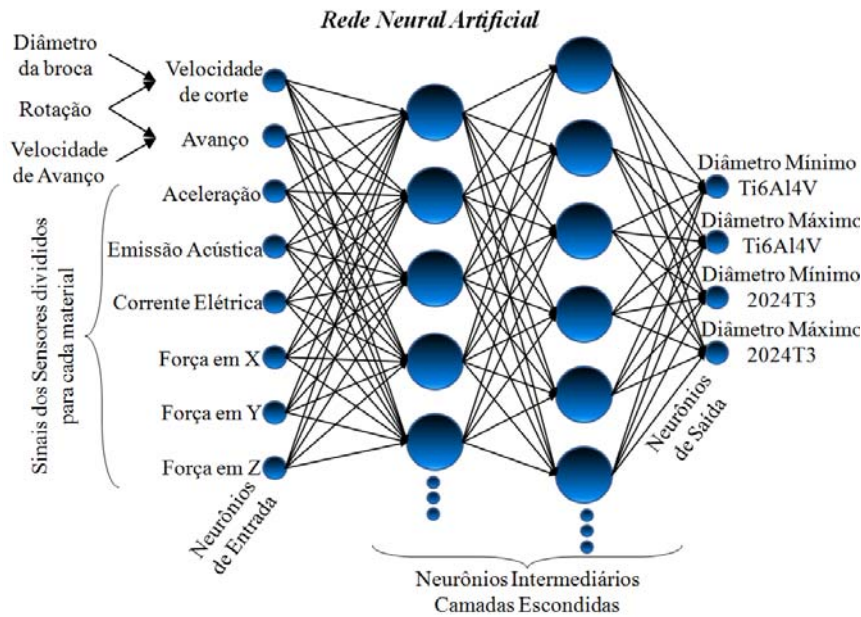


Figura 4. Arquitetura da rede neural artificial utilizada

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de obter uma comparação visual do resultado dos diâmetros obtidos, foi calculada a média e desvio padrão dos diâmetros medidos em cada condição de corte testados, mostrados na Fig. (5).

Da avaliação da Fig. (5) é possível verificar que a média dos diâmetros da liga de alumínio é superior a média dos diâmetros da liga de titânio para todas as condições testadas. Essa característica está ligada as propriedades mecânicas do material. A liga 2024T3 por apresentar menor dureza sofre perda de material devido ao atrito gerado durante passagem do cavaco, apresentando furos mais alargados que os respectivos na liga de titânio, conforme descrito por Worthington & Rahman (1979). Esta característica seria ainda agravada se a constituição do pacote fosse invertida, obrigando o cavaco da liga de titânio a sair pelo interior do furo no alumínio.

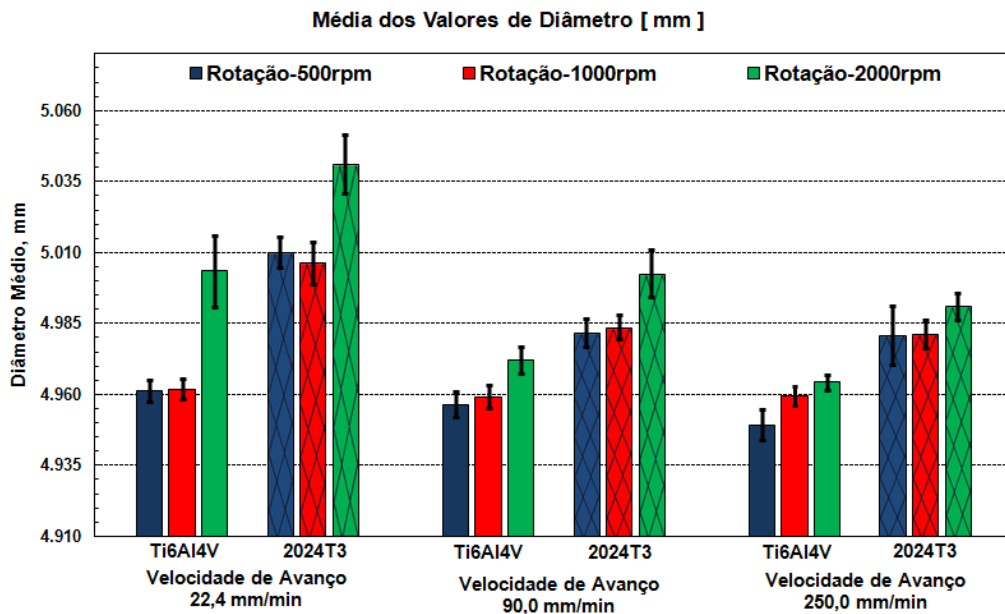


Figura 5. Valores de média e desvio padrão do diâmetro dos furos para as diferentes condições de usinagem

A Fig. (5) também mostra que para a quase totalidade dos casos, o diâmetro médio diminuiu com o aumento da velocidade de avanço. Ao contrário do que foi encontrado por Batzer et al. (1998) na furação de aços, baixas velocidades de avanço representam nestes materiais, a geração de cavacos longos e contínuos que atrim contra a parede interna do furo promovendo o alargamento dos furos.

Ainda é possível verificar que o aumento da rotação da ferramenta gerou furos de diâmetros maiores ou estatisticamente iguais aos gerados em condições de usinagem com menor rotação. Isso pode ser explicado pelo fato de que quanto maior a rotação, maior a temperatura da ferramenta durante o processo. Este aumento de temperatura faz com que parte do material fique incrustado na ferramenta de corte, através de pontos de micro fusão, alterando sua geometria e aumentando seu diâmetro efetivo (Batzer et al, 1998). A maior rotação promove ainda maior desgaste da ferramenta, promovendo a perda de corte e desbalanceamento de forças devido à irregularidade no desgaste o que também é responsável pelo o aumento de diâmetro.

Os dados colhidos durante a geração de cada furo somado as condições de usinagem foram aleatoriamente divididos e apresentados as redes neurais, conforme arquitetura mostrada na Fig. (4), para seu treinamento, validação e teste, em proporções de 60% dos dados para treinamento, 20% para validação e 20% para treinamento. Utilizando o MatLab, uma rede *feed forward* com algoritmo de atualização de pesos de *back propagation* foi contruída.

Foi desenvolvida uma rotina computacional para escolha dos parâmetros da rede, como número de camadas escondidas, número de neurônios por camada, momento e taxa de aprendizagem. Esta rotina combinava estes parâmetros, treinava a rede e determinava o erro de cada configuração para posterior comparação e determinação da condição ótima testada. Desta análise, o menor erro foi conseguido utilizando uma rede com 3 camadas escondidas (com 15, 10 e 15 neurônios, respectivamente para a primeira, segunda e terceira camada), momento de 0,2 e taxa de aprendizagem de 0,3.

A eficiência do sistema foi medida 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, e a partir destas diferenças, foram calculados os erros mostrados na Tab. (1). 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 de cada condição resulta no erro médio absoluto.

Tabela 1. Erro calculado a partir das saídas das Redes Neurais em comparação com os valores medidos. Valores médios obtidos em uma amostragem de 267 furos.

Material	Diâmetro analisado	Diâmetro médio (mm)	Erro Médio	
			Absoluto	Relativo (mm)
Ti6Al4V	Diâmetro Mínimo	4.974	1.467E-03	0.0073
	Diâmetro Máximo	4.967	1.365E-03	0.0068
2024T3	Diâmetro Mínimo	4.999	1.790E-03	0.0089
	Diâmetro Máximo	5.007	1.677E-03	0.0084

As saídas das redes e os diâmetros medidos são mostrados de forma gráfica na Fig. (6). Da avaliação dos dados apresentados na Tab. (1) e mostrados pela Fig. (6) é possível verificar que as redes neurais cumpriram com a meta de determinar o diâmetro com bastante sucesso, apresentando erros baixos e seguindo o comportamento do diâmetro nas diferentes condições de corte testadas.

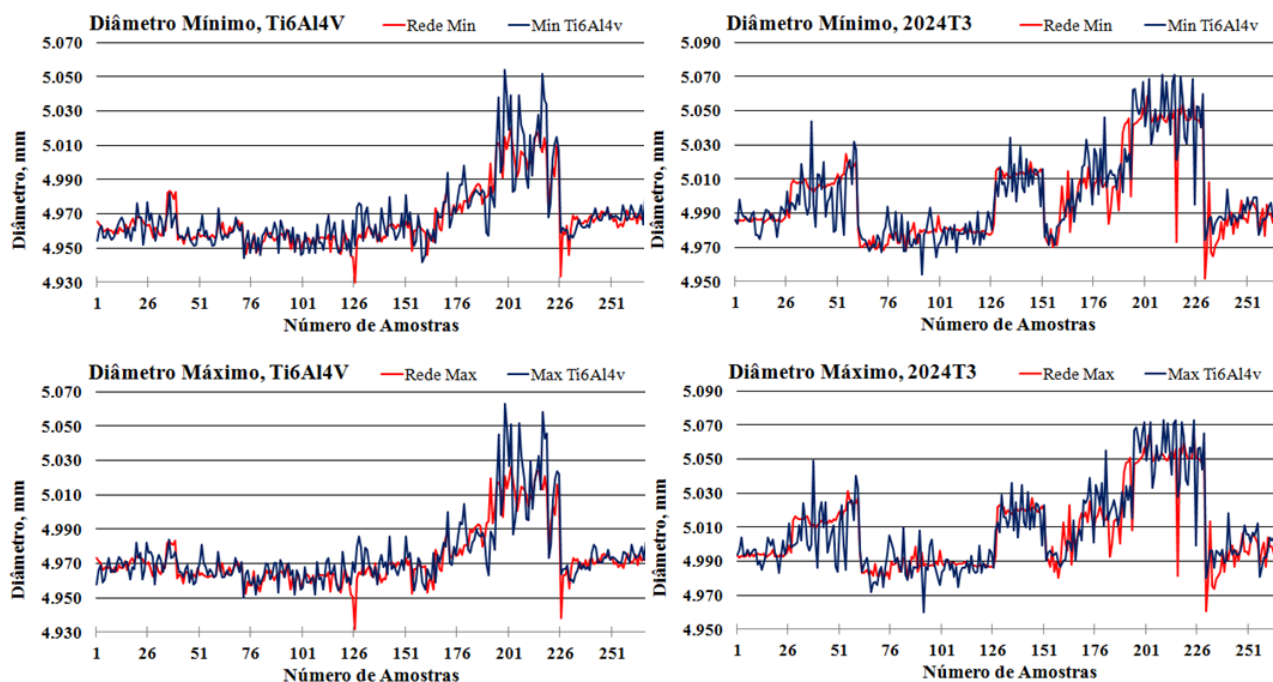


Figura 6. Comportamento da rede neural artificial na estimação do diâmetro

Erros da ordem de 0.007 e 0.008 mm, obtidos respectivamente para a liga de titânio e para a liga de alumínio são considerados pelos autores bastante baixos e toleráveis à aplicação do controle da maioria dos processos industriais. Na indústria aeronáutica, por exemplo, a variação permissível para furos de precisão está na casa de 0.050 mm, o que em um processo não marginal engloba o erro gerado pela rede.

Apesar dos dados obtidos serem altamente satisfatórios, os autores acreditam que novos trabalhos devem ser desenvolvidos a fim de melhorar ainda mais a capacidade da rede na determinação dos furos, através do estudo de diferentes tipos de rede, aplicação de estatística aos sinais estudados ou mesmo implementação de novos sensores, como um termopar para determinação da temperatura da ferramenta durante o processo.

6. CONCLUSÃO

A utilização de Robôs e Máquinas CNC traz à manufatura elevada precisão e fornece alta flexibilidade a determinação de condições de usinagem. Apesar de terem grande influência no desenvolvimento dos processos de usinagem percebido ao longo das últimas décadas, estas máquinas ainda carecem de sistemas robustos e integrados que permitam a partir de dados provenientes do processo supervisionar ou controlar as saídas esperadas.

Este trabalho propôs a utilização de um sistema de multi-sensores e redes neurais artificiais à determinação dos furos produzidos em um processo de furação de um pacote composto por uma liga de titânio seguida de uma liga de alumínio largamente utilizada na indústria aeronáutica, utilizando uma broca helicoidal de metal duro.

Os resultados apresentados mostraram a eficiência da ferramenta proposta, tendo as redes determinado os diâmetros com erros toleráveis ou mesmo desprezíveis a grande parte dos processos industriais mostrando assim aplicabilidade e viabilidade da ferramenta dentro de ambientes de manufatura, contribuindo com a redução de custos gerados por retrabalhos, descarte de peças e tempos de medição por agentes de qualidade.

Apesar de satisfatórios, os autores deste trabalho incentivam o desenvolvimento de novas pesquisas nesta área buscando melhorar ainda mais os resultados aqui obtidos ou vez que a literatura sobre o tema proposto ainda é bastante escassa.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de prestar seus sinceros agradecimentos à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) que financiou este trabalho através de processo de Auxílio à Pesquisa e à empresa OSG que forneceu gratuitamente as ferramentas de corte utilizadas, se mostrando uma empresa moderna, que investe em pesquisa e inovação para seu desenvolvimento tecnológico.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu-Mahfouz I., 2003; "Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network"; *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 pp.707–720.
- Aguiar, P.R.; Cruz, C.E.D.; Paula, W.C.F.; Bianchi, E.C., 2008; "Predicting surface roughness in grinding using neural networks. Robotics, Automation and Control. 1 ed. Vienna: I-Tech Education and Publishing KG, v. 1, pp. 33-44.
- Barton, R.P.; Thangaraj A.R., 1990; "A neural network approach to drilled hole quality monitoring based on machine spindle vibrations". *Trans. NAMRI/SME* pp.232–239.
- Batzer, S.A.; Haan, D.M.; Rao, P.D.; Olson, W.W.; Sutherland, J.W., 1998; "Chip morphology and hole surface texture in the drilling of cast Aluminum alloys"- *Journal of Materials Processing Technology* 79 pp.72–78.
- Bayly, P.V.; Lamar, M.T.; Calvert, S.G., 2002; "Low-frequency regenerative vibration and the formation of lobed holes in drilling", *Transactions of the ASME* 124 pp.275–566.
- Curt E. Everson, S. Hoessein Cheraghi, 1999; "The application of acoustic emission for precision drilling process monitoring", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, pp.371–387.
- E. Jantunen, 2002; "A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling" - , *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 42 pp.997–1010.
- Guiberta, N.; Parisa, H.; Rechb J., 2008; "A numerical simulator to predict the dynamical behavior of the self-vibratory drilling head" - *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 pp.644–655.
- Huang, B. P.; Chenb, J. C.; Li, Y., 2008; "Artificial-neural-networks-based surface roughness Pokayoke system for end-milling operations", *Neurocomputing* 71 pp.544–549.
- Lin, S.C.; Ting, C.J., 1996; "Drill wear monitoring using neural network", *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 36 pp.465–475.
- Liu, Z.; Forsyth, D. S.; Marincak, A.; Vesley, P., 2006; "Automated rivet detection in the EOL image for aircraft lap joints inspection", *NDT&E International* 39 pp. 441–448
- Noori-Khajavi, A.; Komanduri, R., 1995; "Frequency and time domain analyses of sensor signals in drilling--ii. Investigation on some problems associated with sensor integration", *Int. J. Mach. Tools Manuf.* Vol. 35, No. 6, pp. 795-815.
- Özel, T. Karpaz, Y., 2005; "Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks" - *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 pp.467–479.

- Panda, S.S., Singh, A.K.; Chakraborty, D.; Pal, S.K.,2006; “Drill wear monitoring using back propagation neural network”, Journal of Materials Processing Technology 172 pp.283–290.
- Pirtini,M.; Lazoglu, I., 2005; “Forces and hole quality in drilling”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 45 pp.1271–1281.
- Ralph W.C., Steven J. W., Toivonen P., Makeev A.,2006; Newman Jr J.C., “Effect of various aircraft production drilling procedures on hole quality” - International Journal of Fatigue 28 pp.943–950.
- Sick, B., 2002; “Online and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of research”, Mech. Syst. Signal Process. 16 (4) pp. 487–546.
- Worthington, B. Rahman, M. H., 1979; “Predicting breaking with grooved type breakers”, Int. J. Mach. Tool Des. Res. 19.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste trabalho.

UTILIZATION OF MULTI-SENSORS AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR INDIRECT DETERMINATION OF A HOLE DIAMETER IN DRILLING PROCESS.

Carlos Eduardo Dorigatti Cruz, carlosdorigatti@yahoo.com.br¹

Paulo Roberto de Aguiar, aguiaopr@feb.unesp.br¹

João Gabriel Contrucci, juaogonzo@hotmail.com¹

Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br²

Luiz Sanchez, sanchez@feb.unesp.br²

Arthur Alves Fiochi, aafiochi@yahoo.com.br²

¹University of São Paulo State – Electrical Engineer Department. Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, s/n, P.O. Box 473 - 17033-360, Bauru - SP

² University of São Paulo State – Mechanical Engineer Department. Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, s/n, P.O. Box . 473 - Cep. 17033-360, Bauru – SP

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 predicted and controlling methods. Sensors and Artificial Neural Network have been successful utilized in many system of drill wear monitoring along the last decades. These studies sought to reduce downtime machine and to reduce quality problems as reworks and work-piece discard. However in many industrial fields, to supervise the tool wear is not enough to guarantee product qualities. Roughness, burr formation and hole diameter are some examples of important process results. In this area of knowledge the number of methods is still limited or inexistent. This paper brings a contribution on drilling process monitoring. The target of this paper was to determine hole diameter product in a drilling process using an helix carbide drill. Using a system of multi-sensor installed in the machine tool the signals were record from the process and used as input in a neural network for various machining parameters. The results show success in the proposed model as the calculated error given from the difference between the measured values and neural network output were low or negligible for the application in majority of drilling industrial application.*

Keywords: *drilling process monitoring, hole diameter, neural network, sensor utilization.*

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper