MONITORAMENTO DOS PROCESSOS DE FRESAMENTO – UMA VISÃO DOS ÚLTIMOS ANOS

Pedro Márcio do Carmo Silva [(1)] (pdromarcio@gmail.com), Guilherme Lopes Brandão[(1)] (gui.lopes.brandao@gmail.com), Lincoln Cardoso Brandão [(1)] (lincoln@ufsj.edu.br)

[(1)] Universidade Federal de São João del- Rei (UFSJ) – Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC – Praça Frei Orlando,170 - Centro

RESUMO: *A usinagem é um dos métodos de manufatura mais importantes da atualidade, estando presente em diversas áreas de atuação na indústria, como a automotiva, a aeronáutica, a naval, a aeroespacial, a eletrônica, entre outros. Dessa forma, é de grande importância o estudo e desenvolvimento de sistemas de monitoramento de parâmetros confiáveis, visando o aumento de produtividade, maior qualidade e menor custo. Alguns parâmetros possuem maior influência que outros em relação ao desgaste da ferramenta, acabamento superficial, formação de cavacos, entre outros. Assim, torna- se necessário entender cada parâmetro e correlacioná-los entre si, a fim de se obter um resultado satisfatório, principalmente os sinais de emissão acústica. Devido a isso, este artigo faz uma revisão a partir de diferentes abordagens aos experimentos relacionados ao fresamento frontal, utilizando variados métodos a fim de se mensurar e monitorar as variáveis de processos, de forma direta e indireta, analisando os resultados com o auxílio de modelos analíticos e experimentais, estabelecendo critérios de vida útil a ferramenta, além de um processo totalmente otimizado.*

PALAVRAS-CHAVE: *FRESAMENTO, DESGASTE DA FERRAMENTA, SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA.*

MILLING PROCESSES MONITORING – A VIEW OF THE LAST YEARS

ABSTRACT: *Currently, machining is a fundamental manufacturing method, being present in several areas of activity in the industry, such as automotive, aeronautics, naval, aerospace, electronics, among others. Thus, it is of utmost importance to study and develop systems for monitoring reliable parameters, aiming at increasing productivity, higher quality, and lower cost. Some parameters have more significant influence than others concerning tool wear, surface finish, chip formation, among others. Thus, it is necessary to understand each parameter and correlate them with each other, to obtain a satisfactory result, mainly the acoustic emission signals. Because of this, this article reviews different approaches to experiments related to frontal milling, using various methods to measure and monitor process variables, directly and indirectly, analysing the results with the aid of models analytical and experimental, establishing tool life criteria, in addition to a fully optimized process.*

KEYWORDS: *Milling, tool wear, acoustic emission signals.*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

Nos últimos anos, nota-se uma evolução nas operações relacionadas ao fresamento devido aos esforços de pesquisa relacionados com o entendimento, principalmente, das forças de corte envolvidas no processo. Segundo Luan (2016), processos de usinagem são amplamente utilizadas nas indústrias automotiva e aeroespacial, além disso, estão entre as atividades de manufatura mais importantes na atualidade.

Semelhante a outras atividades importantes de manufatura, os processos de usinagem trazem impactos ambientais significativos e riscos à saúde ocupacional. Dessa forma, uma melhor análise do processo se tornou crucial para sanar eventuais problemas decorrentes dele. Sendo assim, com o decorrer dos anos, vem ocorrendo um desenvolvimento considerável em relação a custo, melhores qualidades de superfície e redução no tempo.

A manufatura é um dos setores industriais que mais demandam energia, portanto, muitas oportunidades potenciais de economia de energia podem ser concebidas, analisadas e testadas. Universidades e centros de pesquisa, junto com indústrias, estão tratando desse tema. Uma vez que as ferramentas mecânicas são altamente difundidas nos sistemas de produção, muitos esforços de pesquisa têm se concentrado na redução do consumo de energia (DIAZ et al., 2010; ALBERTELLI et al., 2015).

Durante o processo de usinagem, alguns fenômenos podem acontecer com a ferramenta devido as grandes tensões envolvidas. Assim, influenciando diretamente na vida útil da ferramenta e na qualidade do produto. Dessa forma, Lauro et al. (2014) dividiram as técnicas que foram utilizadas no estudo em 2 categorias, a primeira seria uma abordagem não invasiva ao processo, de forma indireta - óptica, radioativa, medições de resistividade elétrica, entre outros. Outra seria mais invasiva ao conjunto máquina/ferramenta, uma abordagem direta que é a medição de parâmetro de emissão acústica, ferramenta de corte, força, vibração, temperatura, entre outros. Essas técnicas foram analisadas a fim de se obter vantagens e desvantagens em relação ao monitoramento do desgaste da ferramenta, formação de cavacos, entre outros.

A análise do sinal de emissão acústica é um dos mais eficazes para a determinação do desgaste da ferramenta. A principal vantagem é que a faixa de frequência do sinal é muito maior do que o ruído e vibração do ambiente que não estão associados ao processo de corte Pechenin et al. (2017). De acordo com Ravindra et al. (1997), é definida como ondas elásticas transitórias geradas por uma fonte ou fontes de rápida liberação de energia no interior de um material submetido a um estado de tensão. Essa liberação de energia está associada à redistribuição abrupta de tensões internas, que faz com que as ondas acústicas se propaguem pelo material. Os sinais de emissão acústica permitem identificar alterações na estrutura interna de um material, como deformação plástica e fratura, que são significativas no corte de metal (SILVA et al., 2016).

Têm desempenhado um papel importante nas técnicas de monitoramento modernas os métodos experimentais analíticos e estatísticos, pois são capazes de analisar principalmente, os sinais extraídos de emissão acústica. Sendo assim é importante destacar a importância que vem sendo dada a várias técnicas de processamento desses sinais, como abordada por Kishawy et al. (2018), pois são responsáveis por detectar, analisar e investigar o fenômeno de usinagem desejado. Sendo assim, foram analisadas técnicas como a transformada Wavelet que fornece o domínio da frequência no tempo, além de Transformadas de Fourier, que analisa no domínio da frequência ou densidade espectral de potência.

1.2. Experimentos e Técnicas de Monitoramento e Análises

Com a ampla variedade de variáveis envolvidas no processo de fresamento, o primeiro estudo mostrado nessa revisão, foi realizado por Silva et al. (2016), no qual foi levado em conta os parâmetros de emissão acústica e sinais de potência extraídos do motor principal da máquina. O último citado possui grande vantagem em ser utilizado, por não ser invasivo ao processo de usinagem. Após a aquisição e análise de dados os sinais adquiridos de emissão acústica e potência de corte, foi possível coletar vários parâmetros. Um deles, calculado a partir dos espectros de potência.

Este foi usado para medir a diferença na intensidade de energia entre os estágios de desgaste da ferramenta. Com o aumento da área de contato entre a face do flanco da ferramenta e

a peça de trabalho e a diminuição do ângulo de inclinação, houve um aumento de 10 a 15% na potência de corte (média) devido ao atrito e consequentemente as forças e potência de corte. Com o objetivo de eliminar possíveis problemas na alimentação de rede, decidiram normalizar a energia de corte. Assim, cada passo medido da ferramenta era baseado na etapa inicial (ferramenta nova). Quatro testes vida útil de ferramenta foram considerados e foi observado diferentes tendências de resposta, apesar de todas possuírem a tendência de crescimento.

Seguindo a mesma tendência da potência de corte, o parâmetro que geralmente mostrou uma boa correlação com o desgaste da ferramenta em todo teste de vida útil foi a assimetria normalizada em relação aos demais analisados (curtose, assimetria, RMS, etc). No entanto, a assimetria normalizada demonstrou a dificuldade de trabalhar com dados de emissão acústica devido a sua dispersão e os valores extremos apresentados. Sendo assim, tornou-se necessário a introdução um parâmetro para ajudar a resposta extraída do sinal. Uma transformada rápida de Fourier foi aplicada nesses sinais e mostrou que o comportamento da energia geralmente difere em diferentes estágios de desgaste.

Produzindo cerca de 91% de resultados satisfatórios na fresagem final, foi comprovado a eficácia dos métodos de emissão acústica e corte de sinais de energia para o desempenho da rede neural probabilística, que também pode ser melhorada através um novo parâmetro extraído da densidade espectral de potência da EA. Porém, foi verificado um aumento de complexidade das análises devido a sensibilidade do sinal de EA.

Com o intuito de utilizar os sinais de EA não só para monitoramento e análise da progressão do desgaste da ferramenta, mas também para o monitoramento da formação de cavacos, Kishawy et al. (2018) apresentaram vários métodos utilizados para análise e processamento desses sinais. Atualmente, existem diversas técnicas de analises e monitoramento para os processos de corte, que podem ser divididos em abordagens físicas diretas, e abordagens indiretas(online).

Para obter os sinais de Emissão acústica, a seleção das técnicas de processamento de sinais devem ser adequadas. Dessa forma, utilizou- se a transformada discreta de cosseno e a transformada discreta de Fourier, que mostraram resultados promissores na extração do componente de frequência fundamental que pode expressar e analisar a evolução do desgaste da

ferramenta. Dessa forma, ele concluiu que para que um monitoramento seja eficaz, pesquisas mostraram que a análise do espectro no domínio da frequência é melhor que no domínio do tempo para encontrar uma correlação adequada entre os sinais de emissão acústica e várias características de usinagem. Além disso, a configuração e a localização do sensor de emissão acústica são fatores muito influentes que afetam a aplicação.

Ligas de titânio são amplamente utilizadas na indústria aeroespacial devido a suas características extremamente vantajosas, como a relação resistência-peso, densidade mais baixa, e resistência superior à oxidação, corrosão, fadiga e fratura (EZUGWU et al., 1997). No entanto, são conhecidas como materiais de difícil usinagem, especialmente em velocidades de corte mais altas devido as suas propriedades superiores (MACHAI et al., 2012). Com isso, Huang et al. (2015) analisaram as forças de corte e sinais de aceleração do fuso comparando os resultados através do fresamento de ligas de titânio Ti-6Al-4V de parede fina e parede não fina sob os mesmos parâmetros de corte.

Após analisados cem grupos de experimentos na fresagem de liga de titânio, com mínima aceleração e cortes nos sinais das forças, foram constatadas o aumento do valor da aceleração com o aumento do desgaste da ferramenta. O desgaste é aumentado com a ampliação da força de corte Fy. Além disso, paredes finas demandam maior energia de entrada em relação as paredes de maior espessura devido a vibração ocasionada pela baixa rigidez. No processo inicial de fresagem (ferramenta nova) foi observado uma maior contribuição energética da frequência de passagem do dente da ferramenta em relação a frequência do fuso que aumenta gradativamente com o desgaste da ferramenta devido as alterações na frequência da força de corte. Após um tempo de processo e a ferramenta possuindo 0.18 mm de desgaste a contribuição energética de frequência do fuso também mantém em relação a frequência de passagem do dente por causa de um sério desgaste da ferramenta que fazia com que cada aresta de corte suportasse as diferentes cargas de corte.

Com o intuito de otimizar a energia e tempo consumido no processo de usinagem, Albertelli et al. (2016) desenvolveram um modelo capaz de mensurar o consumo de energia da máquina mesmo com a variação dos parâmetros de processo, em diferentes situações (usinando ou parado a espera de alguma ação do operador) e fases de produção detalhando o consumo em cada

componente unido a máquina, como sistemas auxiliares, os eixos, o chiller de eixos, o sistema de troca de ferramentas, o transportador de cavacos e o sistema de fuso. Utilizando uma máquina CNC equipada com eixos lineares, foram realizadas as medições experimentais. Devido a ser uma máquina voltada a produção em massa, vários testes foram realizados a fim de se obter os parâmetros de economia de energia, como stand-bay, troca automática de ferramentas, etc. Para identificar o consumo de energia nos eixos, foi utilizado um medidor de energia instalado no acionamento dos eixos, com o intuito de comparar os valores de potência calculados e medidos pela máquina, assim obtendo um erro de aproximadamente 8%, tornando bem preciso os instrumentos utillizados na máquina.

Visando simular e analisar condições interessantes e viáveis a pesquisa, parâmetros associados ao material e à vida útil da ferramenta foram alterados utilizando diferentes materiais (aço de alta liga, alumínio e ligas de titânio). Diferentes contextos de produção foram simulados a fim de se obter a melhor configuração. Simulações em que o tempo de preparação mudava drasticamente (visando cenários pouco e muito automatizados) foram feitos. Valores mais altos de corte podem ser obtidos somente quando ligas de alumínio são usinados. A contrubuição dos eixos para outros tipos de materiais são significativamente maiores. Quando aço e titânio são usinados, a redução de energia em espera pode trazer aprimoramentos de corte mais baixos. Mas a economia de energia é garantida apenas com valores máximos de profundidade radial e avanço permitidos. Foi observado que valores que minimizam a energia gasta pelo sistema se diferem ligeiramente de valores que minimizam o tempo gasto. Dessa forma, valores máximos possíveis de parâmetros de corte fornecem energia mínima de consumo, mesmo que impliquem em maiores cargas nos eixos.

Quando se trata de usinagem, medições precisas são necessárias para que se possa compreender todos os estados de corte durante o processo e suas instabilidades. Com isso, Scippa et al. (2015) abordou em seu estudo, uma técnica de compensação baseado no filtro de Kalman para essas instabilidades geradas pelas vibrações circundantes do ambiente e limitações dos próprios transdutores utilizados no processo. Testes foram realizados para verificar a eficácia do filtro, utilizando forças de diferentes sinais de entrada geradas por meio de um agitador. Foram empregadas excitações chirp sine sweep em ondas senoidais puras para haver comparação do

comportamento do filtro em algumas frequências específicas. A fim de investigar melhorias de precisão em algumas frequências específicas (10-1300 Hz), foram empregados o método de elaboração paralela.

Após 3 testes em 2 velocidades diferentes, em operações de fresagem de flanco e lateral. O requisito de compensação dinâmica é confirmado através da comparação entre as forças de corte medidas no eixo Y com e sem a compensação de filtragem. É interessante sublinhar que esse resultado é consistente com a resposta do dinamômetro, que é quase linear na faixa de baixa frequência. Distorções mais relevantes devem ser experimentadas se forem utilizadas frequências de passagem do dente mais altos. Após obter precisão e eficácia em uma ampla faixa de frequência, os métodos de ajuste de banda e elaboração paralela representam uma boa solução para estender a largura de banda compensável sem enfrentar limitações numéricas, sendo necessário a utilização mesmo em baixas frequências.

Apresentando testes extraídos em aço 1035, Pechenin et al. (2017) comparou valores de parâmetros de emissão acústica com os valores de referência da força de corte, assim, fazendo uma análise adequada do processo. Usando a transformação Haar, os sinais de emissão acústica do sensor foram processados e os problemas de identificação do processo de corte, solucionados. O método utilizado na filtragem de todo o espectro de emissão acústica é realizado usando decomposição Wavelet. Assim, linhas do tempo podem ser traçadas para cada área de inserção dos dentes fresadores. Com o intuito de realizar a filtragem dos sinais de início e fim do período de roteamento direto, um algoritmo foi criado para valores de alta frequência do espectro de áudio. Além disso, foi desenvolvido uma análise espectral baseada na decomposição de Fourier do sinal de emissão acústica para determinar o período de sinal onde dois dentes fresadores adjacentes são inseridos.

A possibilidade de usar sinais de emissão acústica para monitorar o desgaste da ferramenta foi confirmado através de uma análise entre o sinal filtrado de emissão acústica e a força de corte resultante. Com isso, viabilizando o método adaptativo criado para diagnosticar o desgaste para o fresamento, que pode ser descrito através de um diagrama.

De forma semelhante, Luan et al. (2018) propuseram um modelo de previsão do processo de fresamento de face visa a redução da complexidade do processo de modelagem em relação aos modelos matemáticos anteriores para as análises de dados de potência de corte. Foi utilizado blocos retangulares de HT250 para a usinagem com a variação de parâmetros em cada experimento. Em cada experimento eram utilizados diferentes valores de avanço, e profundidades de corte radial e axial constantes. Com isso, os valores de força e potência de corte seriam coletados para assim verificar a precisão do modelo proposto através das análises de erros feitas entre os valores entregues pelo modelo e o experimento.

Durante o processo de fresamento, alguns fatores não incluídos na análise surgiram, como vibração da ferramenta, rigidez do sistema de transmissão e heterogeneidade do material, influenciaram no resultado final de forças de corte. O pico de força correspondeu aos resultados de simulação, no entanto, o modelo apresentou erros de 0,78% de resultados de força de corte média. Na análise dos dados de potência de corte, foi utilizado um filtro para cancelar o sinal de vibração, dessa forma, os períodos de energia mudaram de tendência, correspondendo aos resultados experimentais. Os erros foram de 0,1% e 0,5% para valores de potência máximo e médio, respectivamente para o modelo proposto, e valores médios de potência máxima e média foram de 0,076% e 0,208%, respectivamente. O erro médio de predição de energia foi um pouco maior que o máximo, devido a vibração e outras fatores incertos durante o processo de corte.

Visto que havia uma necessidade de fabricação de moldes e matrizes com geometrias complexas na época, Arruda et al. (2014) buscaram monitorar e analisar o desgaste de fresas de ponta esférica (ball nose) com base nas informações obtidas através da potência consumida pelo motor principal da máquina. Primeiramente, foram utilizados os mesmos procedimentos com uso de três fresas com especificações idênticas, dessa forma, ambas ferramentas possuíam o mesmo balanço. O material da peça escolhido para tal experimento, foi um aço AISI P20. Cada ferramenta foi utilizada para a capitação em um nível de desgaste. Portanto, é possível conhecer a variação dos valores das fases da corrente elétrica com precisão, bem como a energia elétrica durante a operação do motor. As condições de corte foram definidas usando a variação da taxa de alimentação em três níveis e fixando a profundidade radial e axial do corte. A fim de obter um

padrão de comparação, sendo o foco principal a condição da ferramenta, ângulos de inclinação diferentes foram usados durante o processo de fresagem.

O desgaste proporcionou uma redução na saliência e proporcionalmente uma diminuição na seção de corte. Portanto, foi constatado que uma ferramenta no início de sua vida útil necessita de maior energia elétrica em relação a uma ferramenta mais próximo do fim de sua vida útil. Em relação ao torque, foi verificado valores mais altos para ferramenta gasta. Essa variação pode ser atribuída a fatores como, aumento do desgaste da ferramenta, variação da dureza da peça de trabalho, mudança de temperatura na interface ferramenta-peça de trabalho e expansão térmica da peça de trabalho devido ao aumento de temperatura. Analisando as tabelas, pode se verificar que tanto o torque e a energia elétrica diminuem com o aumento do ângulo para um ângulo inicial de 0°. Isso se dá devido ao menor cisalhamento e maior esmagamento gerando um mecanismo de corte ruim. Dessa forma, deve ser evitado esse fenômeno, apesar de fornecer fornece um bom acabamento da superfície fresada, mas pode acelerar o desgaste da ferramenta. Por outro lado, aumentando o ângulo da superfície de corte, ocorre a diminuição dos esforços de corte como torque, força de corte e, consequentemente, a energia elétrica, tornando o corte mais eficaz. Além disso, a velocidade de corte aumenta e proporciona cisalhamento com mais precisão e melhor acabamento.

Foi comprovado a eficácia do analisador de energia utilizado no experimento através da detecção da variação de energia nos variados estados da vida útil da ferramenta com ótima precisão. Os parâmetros analisados (energia elétrica e o torque) diminuíram com o desgaste da ferramenta. Além disso, o sistema de monitoramento elétrico é mais facilmente montado na máquina do que os tradicionais dispositivos.

Com o intuito de garantir a precisão e qualidade geral dos componentes em larga escala de produção nas diversas etapas de fabricação (desbaste, semia-cabamento e acabamento), Uekita et al. (2016) propuseram uma técnica de monitoramento de condição da ferramenta visando também a otimização e segurança durante a troca de ferramenta, dessa forma, entendendo melhor a transição detalhada do estado da ferramenta em relação ao comprimento de corte. Para validar a estratégia de fusão multisensor, a fresagem de um rotor de turbina a vapor foi selecionada como

exemplo, pois requer um acabamento superficial fino da ordem de vários microns e precisão dimensional menor que 0,1 mm na profundidade do sulco para montagem subsequente. Com o auxílio de sensores, foram possíveis acompanhar os testes de longevidade (consumo de energia, corrente do motor do eixo e emissão acústica).

Analisando os resultados obtidos entre os parâmetros de usinagem utilizados, foi constatado que apesar do volume total de cavacos retirados nos diferentes experimentos serem quatro vezes maior, o decremento em relação ao valor médio da quarta ranhura foi constante. Porém, o total de emissão acústica relacionado a energia é parcialmente afetada pelas condições de usinabilidade do material. Note-se também o que os valores dos sinais de emissão acústica no acabamento são maiores que os de semi-acabamento, enquanto o consumo de energia é mais alto no semi-acabamento. Isso ocorre devido as respostas dos sinais em relação a formação de cavacos, desgaste de ferramentas, propagação de trincas e eventos anômalos relacionados à superfície. Dessa forma, com esses acontecimentos se intensificando, o maior atrito em ferramenta peça contribuiu para o aumento dos sinais de emissão acústica. Portanto, é recomendável o monitoramento desses sinais, para que assim, possam garantir uma boa qualidade não só da superfície acabamento como também, do estado da ferramenta e a integridade da superfície no fresamento para qualquer etapa.

Foi confirmado a aplicabilidade a combinação de corrente do motor do eixo e emissão acústica para as etapas de desbaste e acabamento no processo de fresagem. Utilizando testes de longetividade, o desgaste da ferramenta foi esclarecido com o auxílio de um diagrama bidimensional e a análise de séries temporais da corrente do motor do eixo-árvore. Utilizando sinais de emissão acústica no desbaste, foi possível identificar eventuais danos ao flanco da ferramenta.

Analisar e estimar a vida da ferramenta para um aumento de produtividade em ambientes de manufatura automatizados é de extrema importância na indústria, dessa forma, Olufayo et al.(2014) buscaram correlacionar os parâmetros de usinagem afim de se estimar os critérios necessários a longetividade da ferramenta. Analisando os resultados, pode ser visto que com a variação de parâmetros (velocidade de corte e avanço) diferentes aspectos físicos na ferramenta puderam ser observados. A medida que os experimentos foram aumentando os valores de avanço,

foram sendo observados menor desgaste da ferramenta nas fases iniciais, seguindo de um maior desgaste no decorrer da usinagem formando acúmulo de arestas e ranhuras na ferramenta. No experimento onde ocorreu a máxima diminuição do avanço, foi observado um aumento exponencial no desgaste da ferramenta por altas temperaturas e abrasão onde ocorreram maior ação da fricção entre ferramenta e peça após determinada distância. Alta correlação de energia, RMS, média, desvio padrão e soma do coeficiente Wavelet podem ser observados. No restante dos experimentos, onde ocorreram a diminuição da velocidade de corte e avanço, foram observados menores temperaturas em relação aos anteriores, porém a medida em que a taxa de avanço foi diminuindo, ranhuras foram surgindo na peça em maior intensidade. Fortes impactos da aresta da ferramenta contra a peça foram notados durante a entrada. A magnitude dos recursos de emissão acústica sofreu um aumento correlacionados com o desgaste que ocorre na ferramenta.

Os parâmetros extraídos dos sinais de emissão acústica e soma de Wavelets, puderam ser correlacionadas e utilizadas como entrada para redes neurais através de técnicas evolutivas, para assim, realizar o monitoramento de ferramentas. Sendo assim, concluiu-se que a velocidade de corte influencia mais diretamente no desgaste da ferramenta do que em outros parâmetros. Baixas taxas de avanço repentinas podem gerar lascamentos na ferramenta devido aos impactos com a peça, além disso, a temperatura pode ser mensurada através dos tipos de cavacos que correlacionam as cores com as respectivas temperaturas.

2. DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos trabalhos apresentados, pode-se notar a evolução apresentada nos últimos anos na área de fabricação, mais especificamente no monitoramento dos parâmetros extraídos da ferramenta de corte e condições do processo de remoção de material, se tornando uma tarefa essencial em qualquer configuração de usinagem de precisão moderna. Dessa forma, é de grande importância a implementação de um processo de monitoramento adequado para assim, obter resultados promissores em termos de via da ferramenta de corte, qualidade de produção e custos envolvidos no processo em geral. Com a utilização desses projetos de monitoramento, processos

podem ser otimizados através da análise de instabilidades que podem afetar sua eficácia, além de eventuais tempos ociosos da máquina utilizada no procedimento de corte.

Atualmente, podemos contar com uma gama de transdutores disponíveis no mercado, além de inúmeros projetos apresentados em literaturas para diferentes tipos de análises, podendo ser capazes de mensurar e monitorar grande variedade de parâmetros envolvidos no processo. Existem métodos de monitoramento que para ser montados no processo, são mais invasivos que outros, ou seja, demandam maior contato entre ferramenta e peça a ser usinada, vários exemplos foram apresentados nesta revisão, um deles é apresentado por Huang et al. (2015) onde foi utilizado um centro de usinagem CNC vertical, em que forças nos 3 eixos perpendiculares a superfície da ferramenta foram captadas por um dinamômetro. As vibrações foram monitoradas com o auxílio de sensores piezoelétricos.

Por outro lado, no artigo apresentado por Arruda et al. (2014), além da utilização de um dinamômetro, a energia elétrica no processo de fresamento foi monitorada diretamente no motor elétrico principal. O analisador de energia, forneceu informações técnicas sobre o funcionamento do motor elétrico. O sistema foi conectado a cada das fases de entrada do motor elétrico. Portanto, é possível saber a variação dos valores das fases de a corrente elétrica com precisão, bem como a energia elétrica durante a operação do motor. Dessa forma, salientou a dificuldade de montagem de componentes utilizados para mensurar força e torque em relação aos componentes conectados as entradas do motor elétrico. Além disso, os resultados mostraram que o sistema de monitoramento online com base na energia elétrica podia ser uma boa técnica de monitoramento do desgaste da ferramenta, pois ela foi capaz de detectar a variação da energia elétrica da máquina com o desgaste da ferramenta.

Erros são envolvidos no processo de monitoramento desencadeados de vibrações do sistema, do ambiente e do próprio instrumento utilizado, por isso, torna-se necessário a implementação de uma ferramenta capaz de compensar esses erros. Assim como foi apresentado no estudo de Scippa et al. (2013), onde foi estabelecido um modelo através do ajuste de banda e elaboração paralela. Dessa forma, esses filtros de compensação foram projetados com base na dinâmica do sistema, identificando experimentalmente a sua precisão e eficácia, sendo avaliados

por testes numéricos e experimentais. De forma semelhante, o estudo apresentado por Silva et al. (2016) identificou erros utilizando os parâmetros de forma separada, assim, através da rede neural probabilística, foi capaz de correlacioná-los em uma rede neural artificial, fortalecendo suas qualidades e enfraquecendo suas deficiências individuais, conseguindo resultados satisfatórios.

De acordo com os estudos apresentados, nota-se que existem várias técnicas de detecção que podem ser empregadas no monitoramento de condição da ferramenta, nos diferentes parâmetros extraídos, como: variação de força, vibração, emissão acústica, temperatura, corrente, ondas sonoras entre outras. Sendo assim, as conclusões tiradas através dos experimentos, dependem de métodos estatísticos e analíticos sobre as correlações de desgaste da ferramenta. Um exemplo disso, se dá através de Olufayo et al. (2014), em que se aplica a técnica de transformação Wavelet. Ela foi implementada para decompor o sinal de emissão acústica em várias bandas de frequência. O nível de decomposição foi selecionado com base nos componentes de frequência dominante presentes no sinal. O coeficiente Wavelet revela a melhor banda de frequência correlacionada com as frequências necessárias para o sinal classificação. Dessa forma, através de seus experimentos constatou a redução do tempo pela metade, mas dobrou a resolução de frequência, uma vez que apenas metade da banda de frequência anterior é coberta, aumentando a confiabilidade.

O estudo apresentado por Kishawy et al.(2018) reforça a ideia do uso de técnica de transformação Wavelet, onde afirmou um maior potencial de análises da mesma em relação a transformada rápida de Fourier, especialmente no processo de usinagem. Segundo Zhu et al. (2009), Lauro et al. (2014) e Liao et al. (2007) As propriedades de análise de domínio de frequência do tempo são facilmente coletadas utilizando transformação Wavelet, enquanto a transformada rápida de Fourier só pode obter propriedades globais, em que pode se aplicar técnicas de refinamento das funções, fornecendo infinitas funções básicas possíveis.

3. CONCLUSÃO

Considerando os estudos apresentados sobre as técnicas de monitoramento através do processo de fresamento frontal, podemos chegar ass seguintes conclusões:

O consumo de energia da máquina utilizada está diretamente relacionado com as condições em que a ferramenta se apresenta e com as variações corretas de parâmetros em cada estágio da vida útil da ferramenta. Dessa forma, é de grande importância a escolha correta dos instrumentos utilizados, além do procedimento adequado em cada processo específico, para assim, obter resultados satisfatórios em termos de economia e qualidade.

O monitoramento do desgaste da ferramenta pode ser realizado através de análises de corrente no motor principal (abordagem indireta) de forma significativamente mais simples que as demais técnicas mais invasivas (abordagem direta) ao processo, mantendo um nível considerável de confiabilidade. Dessa forma, eventuais limitações impostas ao processo com a utilização de instrumentos em contato direto com máquina/ferramenta são sanadas.

Os dados coletados no processo, principalmente no que se refere a sinais de emissão acústica, são inconclusivos se não analisados através de técnicas analíticas e estatísticas com o intuito de filtrar e evitar indesejáveis componentes de frequência e sinais de vibração de alto ruído durante o processo de usinagem. Além disso, o posicionamento e a configuração dos sensores utilizados são fatores de alta influência na aplicação e coleta de dados.

Por fim, fatores que visam a diminuição de tempo no processo de usinagem, podem se diferir de fatores que minimizam o gasto de energia da máquina. Dessa forma, altos valores de parâmetros de corte, podem minimizar o consumo de energia mesmo que impliquem em maiores cargas nos eixos.

REFERÊNCIAS

Albertelli, P., Keshari, A., Matta, A., Energy oriented multi cutting parameter optimization in face milling, 2015, Journal of Cleaner Production, 137, 1602-1618, 2016.

Arruda, E.M., Ribeiro Filho, S.L.M., Assunção, J.T. et al. Online Prediction of Tool Wear in the Milling of the AISI P20 Steel Through Electric Power of the Main Motor. Arab J Sci Eng 40, 3321–3328, 2015.

Diaz, N., M. Helu, S. Jayanathan, Yifen Chen, A. Horvath and D. Dornfeld, "Environmental analysis of milling machine tool use in various manufacturing environments," Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, Arlington, VA, pp. 1-6, 2010.

Ezugwu EO, Wang ZM. Titanium alloys and their machinability—a review. J Mater Process Technol 68, 262-274, 1997.

Huang, P.L., Li, J.L., Jia, X.M., Cutting signals analysis in milling titanium alloy thin-part components and non-thin-wall componentes, 2015, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology . 84, 2461-2469, 2016.

Kishawy, H. A.,Hegab, H., Umer, U., Mohany A., Application of acoustic emissions in machining processes: analysis and critical review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 98, 1391–1407, 2018.

Lauro CH, Brandão LC, Baldo D, Reis RA, Davim JP, Monitoring and processing signal applied in machining processes—a review. Measurement. 58,73–86, 2014.

Luan, X., Zhang, S. & Li, G. Modified power prediction model based on infinitesimal cutting force during face milling process. Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech. 5, 71–80, 2018.
Machai C, Biermann D, Machining of β-titanium-alloy Ti10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: cooling with carbon dioxide snow. J Mater Process Technol. 211(6):1175–1183, 2011.

Olufayo, O., Abou-El-Hossein, K. Tool life estimation based on acoustic emission monitoring in end-milling of H13 mould-steel. Int J Adv Manuf Technol 81, 39–51, 2015.

Pechenin, V.A., Khaimovic, A.I., Kondratiev, A.I., Bolotov, M.A., Method of controlling cutting tool wear based on signal analysis of acoustic emission for milling, 2016, Procedia Engineering, 176, 246-252, 2017.

Ravindra, H.V.; Srinivasa, Y.G.; Krishnamurthy, R. 2014, Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. Wear, 212(1): 78–84, 2014.

Sccipa, A., Sallese, L., Campetelli, G., Improved dynamic compensation for accurate cutting force measurements in milling applications, 2013, Mechanical Systems and Signal Processing, 54-55, 314-324, 2014.

Silva,R. H. L. S., Silva, M. M., Hassui. A., A probabilistic neural network applied in monitoring tool wear in the end milling operation via acoustic emission and cutting power signals , Machining Science and Technology , Machining Science and Technology, 3, 386-405, 2016.

Uekita, M., Takaya, Y. Tool condition monitoring for form milling of large parts by combining spindle motor current and acoustic emission signals. Int J Adv Manuf Technol 89, 65–75 (2017).