



Artigo

Monitoramento do desgaste da ferramenta de HSS no processo de torneamento através da potência consumida

Diego Gomes de Assis ^[1] e Ramsés Otto Cunha Lima ^[2]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; di.gomes11@yahoo.com.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; ramses.cunhalima@ufersa.edu.br

Recebido: 28/06/2021;

Aceito: 15/08/2021;

Publicado: 06/12/2021.

Resumo: Durante o processo de usinagem deve-se ter atenção especial à vida da ferramenta de corte aplicada pois, dependendo do material ou tempo do processo, seu nível de desgaste se acentua, tornando-se um problema. Nesta pesquisa, foi realizado o monitoramento do desgaste da ferramenta de aço rápido para o processo de usinagem por torneamento, através de um aparato experimental, verificando ainda, a potência consumida pela máquina durante a evolução deste desgaste. Primeiramente, foram utilizadas cinco ferramentas de aço rápido com dimensões $\frac{1}{4}'' \times 4''$, afiações $\alpha = 8^\circ$, $\beta = 62^\circ$ e $\gamma = 20^\circ$, usinando um tarugo de aço ABNT 1045, com $V_c = 15\text{m/min}$, $n = 118\text{rpm}$, $a_p = 0,5\text{mm}$ e $f = 0,094\text{mm/rot}$. Como critério de parada foi adotado o valor de desgaste de flanco médio de 0,30mm, de acordo com a Norma ISO 3685, medido com um microscópio eletrônico. Com esses dados, foi levantada uma curva de calibração do desgaste x potência consumida pela máquina ferramenta. Para validação desta, o procedimento de usinagem foi repetido com três ferramentas e obtidas suas curvas de desgaste. Os valores medidos apresentaram-se estatisticamente iguais aos valores de intervalo de confiança, validando assim, a curva de desgaste em relação a potência obtida.

Palavras-chave: Monitoramento; Desgaste de flanco; Vida-Útil; Potência; Torneamento.

Abstract: During the machining process, special attention must be paid to the lifespan of the applied cutting tool because, depending on the material or process time, its wear level increases, becoming a problem. In this research, the wear monitoring of high speed steel tool for turning process was carried out, through an experimental apparatus, also verifying the power consumed by the lathe during the evolution of this wear. First, five high speed steel tools with dimensions $\frac{1}{4}'' \times 4''$ were used, sharpening $\alpha = 8^\circ$, $\beta = 62^\circ$ and $\gamma = 20^\circ$, machining an ABNT 1045 steel, with $V_c = 15\text{m/min}$, $n = 118\text{rpm}$, $a_p = 0.5\text{mm}$ and $f = 0.094\text{mm/rev}$. As stopping criterion, the average flank wear value of 0.30mm was adopted, according to the ISO 3685 Standard, measured with an electron microscope. With these data, a calibration curve of wear x power consumed by the machine tool was drawn up. To validate this, the machining procedure was repeated with three cutting tools and their wear curves were obtained. The measured values were statistically equal to the confidence interval values, thus validating the wear curve in relation to the power obtained.

Key-words: Monitoring; Flank wear; Lifespan; Power; Turning.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de monitoramento de usinagem se inserem no contexto de mercado com diversos objetivos, que vão desde a melhor utilização de fluido de corte, às melhores ferramentas, entre outras aplicações. Uma das suas principais é acompanhamento do desgaste da ferramenta considerando-se, principalmente, sua vida útil de maneira a planejar sua substituição [1,2].

É nesse cenário que são inseridos os sistemas de monitoramento da vida útil das ferramentas de corte, principalmente pelo fato de que a produção é diversas vezes interrompida, para que haja troca das mesmas,

quando estas poderiam ser ainda utilizados de uma forma mais eficiente. Isto se dá tendo em vista que na indústria as ferramentas são, muitas vezes, substituídas muito antes do seu fim de vida útil para evitar uma possível fratura quando o desgaste já estiver bastante evoluído. Outra questão importante diz respeito a indústrias de pequeno porte, nas quais não há disponibilidade de recursos para se aplicar em outras técnicas de promover um aumento da vida útil de ferramentas de corte. Dentre estas técnicas, destacam-se o tratamento com agentes condicionadores [3], os quais se propõe a reduzir o atrito entre materiais metálicos ou, até mesmo, aplicação de revestimentos com filmes duros, os quais aumentam a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, sendo depositados por técnicas desde as convencionais Deposição Química de Vapor (CVD) e Deposição Física de Vapor (PVD), até as mais atuais, auxiliadas por plasma [4,5]. Assim, faz-se necessário uma maneira prática, barata, e confiável de se acompanhar a evolução do desgaste das ferramentas de corte.

O setor industrial visa a maior produção possível para sua atividade, associado à menor despesa possível, em busca da qualidade do produto final e um bom retorno de lucro para a mesma. Tendo em vista isso, foram criados os sistemas de monitoramento aplicado à usinagem, na tentativa de minimizar os erros, minimizar a quantidade de paradas, a função do operador, e otimizar o processo de uma forma geral, analisando por exemplo o desgaste da ferramenta, o tipo de fluido, ou até mesmo colisões da ferramenta com a peça.

Os monitoramentos de operações de usinagem podem ser classificados de duas formas [6]:

- Medição direta: onde o valor da variável medida fornece um alto grau de precisão. Este método tem sido utilizado em práticas de laboratório e pesquisas para auxiliar em estudos durante o processo de usinagem.
- Medição indireta: onde o valor da variável medida é posteriormente deduzido usando correlações determinadas de forma empírica. Esse tipo de medição é menos preciso que o método direto, mas também é menos complexo de se obter.

Os sistemas de monitoramento funcionam da seguinte maneira [1,2,7]: os sensores instalados na máquina-ferramenta, captam os sinais do processo de corte, os classificam, com o objetivo de identificar uma escala pré-definida o nível do sinal, atribuindo a ele uma condição da ferramenta. Entretanto, esse sistema de monitoramento tem que ser o mais confiável possível, com o menor custo, ser construído de forma simples, suportar o ambiente industrial, não ser influenciado por ruídos externos, deve ser dependente somente do que se quer montar, ter um baixo tempo de resposta e ser pouco intrusivo [8].

Existem diversos tipos de sistemas de monitoramento de vida útil da ferramenta, entre eles podem ser citados os monitoramentos via emissão acústica, temperatura de corte, vibrações, potência, entre outros. Contudo, todos esses sistemas de monitoramento têm alguns requisitos básicos a serem seguidos [6,7,9], como: estar mais próximo a região de corte, não se deve reduzir o espaço de trabalho, deve resistir à sujeira, cavacos e influências mecânicas, eletromagnéticas e térmicas.

Dentre os tipos de monitoramentos citados, será explanado de forma mais detalhada o processo de monitoramento por potência, o qual utiliza a medição da corrente do motor principal.

1.1. Monitoramento por Potência

Algumas características desejáveis em um sistema de monitoramento vem sendo destacadas [1,6,7,10], como: confiabilidade, baixo custo, simplicidade, suportar ambiente industrial, não ser influenciado por ruídos externos, o parâmetro medido deve ser dependente somente do que se quer monitorar, baixo tempo de resposta, ser pouco intrusivo (não interferir na operação de usinagem) e ser suficientemente sensível para que se consiga acompanhar a evolução do desgaste.

A potência de usinagem resulta da soma das potências necessárias para cada componente da força de usinagem. Ela pode ser medida, experimentalmente por meio da tensão e da corrente elétrica consumida, entretanto, devido à natureza nem sempre linear dessas grandezas e a defasagem de tempo entre elas, a obtenção dessa potência não é uma operação tão simples [11]. Entretanto, dentre os outros tipos de monitoramento, ele é considerado [12] um processo de baixo custo, de tecnologia e operação relativamente simples, de fácil instalação e requer pouco espaço, e nenhum, ou quase nenhum, projeto especial para sua adaptação. Ainda podem ser destacadas [1,6,7,13] as principais vantagens e desvantagens deste tipo de monitoramento, sendo as vantagens: ser uma técnica pouco intrusiva, possuir baixo custo em comparação com outras técnicas de monitoramento de desgaste, possuir tecnologia e operação relativamente simples, ser uma técnica de fácil instalação, não requerer muito espaço, poder ser aplicada à maioria dos motores elétricos (AC e DC) e poder realizar o monitoramento em processo (on-line). Já suas desvantagens são a baixa sensibilidade ao estado de desgaste da ferramenta (não há muitas diferenças entre a potência consumida utilizando uma ferramenta nova

e uma já desgastada) e uma perda de precisão no sistema de monitoramento devido nem toda potência elétrica consumida ser transformada em potência mecânica.

Sua principal vantagem em relação aos outros processos de monitoramento é que os parâmetros relacionados ao motor (nesse caso, a corrente dele) para detectar avarias no processo de corte, é que o aparelho de medição não causa perturbação no processo de usinagem [14]. Uma das formas de ser medida [13,15], é usar a corrente do motor para estimar as forças e potência consumida, para assim desenvolver o sistema de monitoramento de condições da ferramenta. De uma forma geral, segundo [14], é crucial que a relação entre a corrente/potência é linear a força/torque utilizado no processo. Entretanto, existe uma dificuldade em detectar uma mudança relativamente pequena na corrente, causada pelo processo de corte, ou seja, o processo é válido, contudo, se apresenta pouco preciso [7].

Estudos já foram realizados nessa área [16], no qual elaborou-se uma estratégia para realizar o monitoramento do desgaste da ferramenta através da potência de corte, atribuindo a potência da máquina como a potência instantânea mostrada na Equação 1, obtendo curvas de consumo de potência relacionados ao desgaste na fresa.

$$(1) \quad P = V * I * \sqrt{3} * \cos(\varphi)$$

Onde:

P = Potência de corte (W);

V = Tensão (V);

I = Corrente (A);

φ = Defasagem angular entre tensão e corrente

Também foi avaliada a eficácia do sinal de potência que era transmitido para um fuso no motor nos processos de torneamento, furação e fresamento, para realizar o monitoramento das ferramentas [17]. Além disso, o monitoramento do desgaste de um inserto durante o torneamento através da variação de corrente elétrica também foi conduzido [18] mostrando que o método foi capaz de detectar o desenvolvimento do desgaste e, se aplicado em ambiente industrial, a corrente é um sinal claro para o operador de quando a ferramenta se aproxima do fim de vida. Os autores, porém, observam que mudanças na velocidade de corte geram mudanças nos parâmetros elétricos, não sendo possível fixar um valor de corrente para o fim de vida da ferramenta que sirva para todas as velocidades. Em estudo para o desenvolvimento de uma metodologia para monitoramento do desgaste de ferramentas de corte utilizando Rede Neural Artificial (RNA) e os sinais de potência de corte e Emissão Acústica (EA) [19], foi observado que a potência efetiva de corte média têm correlação com o desgaste e a utilização desses parâmetros como valores de entrada em uma RNA proporciona excelentes respostas à rede para prever se a ferramenta está ou não em condições de uso ao longo do processo de usinagem.

Como observado em estudo posterior [18], mudanças na velocidade de corte alteram os parâmetros elétricos usados no monitoramento de desgaste (potência e corrente), mas não é apenas a velocidade de corte que vai ter influência nos parâmetros elétricos, mudanças no material da ferramenta, mudança no material da peça, mudança na operação dentre outros também mudarão os parâmetros elétricos. Contudo, em grandes indústrias, é comum a fabricação da mesma peça utilizando sempre os mesmos processos com os mesmos parâmetros (material de peça, ferramenta, operação etc.), então nesses casos esse fato não seria um problema, podendo assim definir uma potência e/ou uma corrente elétrica como fim de vida para uma ferramenta.

Assim, este trabalho apresenta o resultado do monitoramento da vida útil de uma ferramenta de aço rápido (HSS) no processo de usinagem por torneamento através da evolução do seu desgaste de flanco médio, além de verificar a potência consumida pela máquina, montando assim, um aparato de controle para supervisionar o desgaste da ferramenta, com o objetivo de diminuir essas paradas constantes para trocas de ferramentas, muitas vezes desnecessárias, maximizando o potencial da ferramenta. Neste trabalho foram utilizados conceitos de potência aparente consumida pelo motor da máquina-ferramenta, e não necessariamente essa potência consumida é a real potência de usinagem, devido ao próprio rendimento do motor, e da própria máquina.

Tem-se como objetivo monitorar o desgaste da ferramenta de corte visando elaborar um curva de calibração que relaciona os níveis de desgaste atingidos durante o processo com a potência de corte calculada a partir da corrente consumida, pretendendo-se não ter paradas contínuas no processo de fabricação. A seguir, serão descritos os materiais e equipamentos utilizados, bem como a metodologia aplicada nesta pesquisa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a aplicação dos testes de usinagem, foi utilizado o torno Nardini modelo ND 220 Gold, de alimentação trifásica e motor principal com potência de 7,5 CV, com a finalidade de realizar o torneamento cilíndrico externo de um tarugo de aço ABNT 1045 laminado a quente, de 1" ½. Foram utilizadas cinco ferramentas de corte, de aço rápido (HSS), com dimensões de ¼" x 4", fabricado conforme a Norma DIN 4964, com tolerância dimensional h14, temperado e revenido com dureza de 65 ± 5 HRC, com a finalidade de realizar a usinagem e avaliar o desgaste obtido. A afiação da ferramenta foi feita com ângulos $\alpha = 8^\circ$, $\beta = 62^\circ$ e $\gamma = 20^\circ$, medidos pelo plano ortogonal, em concordância com estudo prévio [4], realizado para comparar a evolução de desgaste de ferramentas de HSS com e sem revestimento, angulação esta, adequada para usinagem do aço ABNT 1045. Um exemplar destas ferramentas é apresentado na Figura 1.



FIGURA 1. Fotografia de exemplar das ferramentas de aço rápido para testes de torneamento.

A usinagem foi realizada com uma profundidade de corte $ap = 0,5\text{mm}$ e avanço $f = 0,094\text{mm/rot}$ [4]. Foram realizados desbastes longitudinais no tarugo com um comprimento $L_f = 100\text{mm}$. A rotação foi estabelecida, inicialmente, com $n = 118$ rpm, tendo em vista que a velocidade de corte utilizada foi de $V_c = 15\text{m/min}$ e a rotação que compensa a redução do diâmetro quando necessário.

A cada dois passes de usinagem, foi realizada uma medição do desgaste de flanco médio, utilizando um microscópio eletrônico com aumento até 1000x. A condição de parada dos testes de usinagem foi com desgaste de flanco médio V_B atingindo o valor de 0,30mm, conforme estabelecido pela norma ISO 3685 como fim de vida para ferramentas de HSS para torneamento. O aparato experimental montado para realizar a medição desse desgaste de flanco médio é mostrado na Figura 2.



FIGURA 2. Fotografia do aparato montado para a medição do desgaste de flanco das ferramentas de corte.

Durante a usinagem, foi verificada a variação da potência consumida pela máquina-ferramenta através de um alicate amperímetro modelo ET-4090, medindo a corrente que passa em um dos três condutores fase que energizam o motor principal do torno, uma vez que a corrente é igual em cada uma das 3 fases. A precisão do alicate amperímetro é de 1% para correntes abaixo de 40A em frequências de 60Hz.

Após a aquisição dos dados de corrente, aplicando-se a Equação 1, foi calculada a potência de corte a partir da potência trifásica do sistema utilizando os valores de tensão 380V fixos, segundo o manual do torno e o fator de potência de 0,92, valor mínimo exigido pela Aneel.

Com a obtenção dos dados de desgaste e de potência consumidas pelo equipamento foram geradas as curvas de desgaste de cada uma das cinco ferramentas, relacionadas com a potência utilizada para a respectiva usinagem. Além disso, foram realizadas análises estatísticas para a obtenção de uma curva de calibração do desgaste de flanco médio das ferramentas em relação à potência consumida, a partir da média amostral para as ferramentas e os parâmetros utilizados, tendo como base valores de média amostral e desvio padrão dos valores obtidos para desgaste e potência e atribuindo um nível de confiança de 90% para estes, através de uma distribuição normal.

Após a obtenção da curva de calibração para o desgaste das ferramentas, foram realizados três testes de usinagem para validação da curva de calibração, de maneira a avaliar se a potência indicada estaria corretamente relacionada ao nível de desgaste da ferramenta de corte em determinado momento. Para tanto, foram utilizados os mesmos parâmetros de corte descritos para os testes com as cinco ferramentas iniciais, levando em consideração a corrente do sistema (e, indiretamente, a potência) como critério de parada. Após isso, realizou-se a medição dos desgastes de flanco médio dessas três ferramentas no momento da parada para compara com a previsão da curva de calibração. Com base em testes do sistema, foi estabelecida uma corrente média no passe de 11,15A, para se atingir um desgaste de flanco médio $V_B = 0,29\text{mm}$.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados dos testes de usinagem para obtenção das curvas de desgaste

Os dados obtidos das correntes durante o processo de usinagem apresentaram algumas variações, sendo assim, foram adotados os valores médios entre a corrente inicial e o valor de corrente mais elevado (porém estável) medido durante a usinagem, para cada passe, obtendo finalmente, um valor de potência médio consumido pela máquina durante os passes realizados. A Figura 3 apresenta as curvas de desgaste de flanco médio, obtidas para as cinco ferramentas testadas. Estas curvas foram geradas a com os dados de leitura de desgaste de flanco médio e a respectiva potência consumida na máquina a cada parada para análise desses desgastes. Estas paradas ocorreram a cada dois passes de usinagem, conforme descrito no tópico 2.

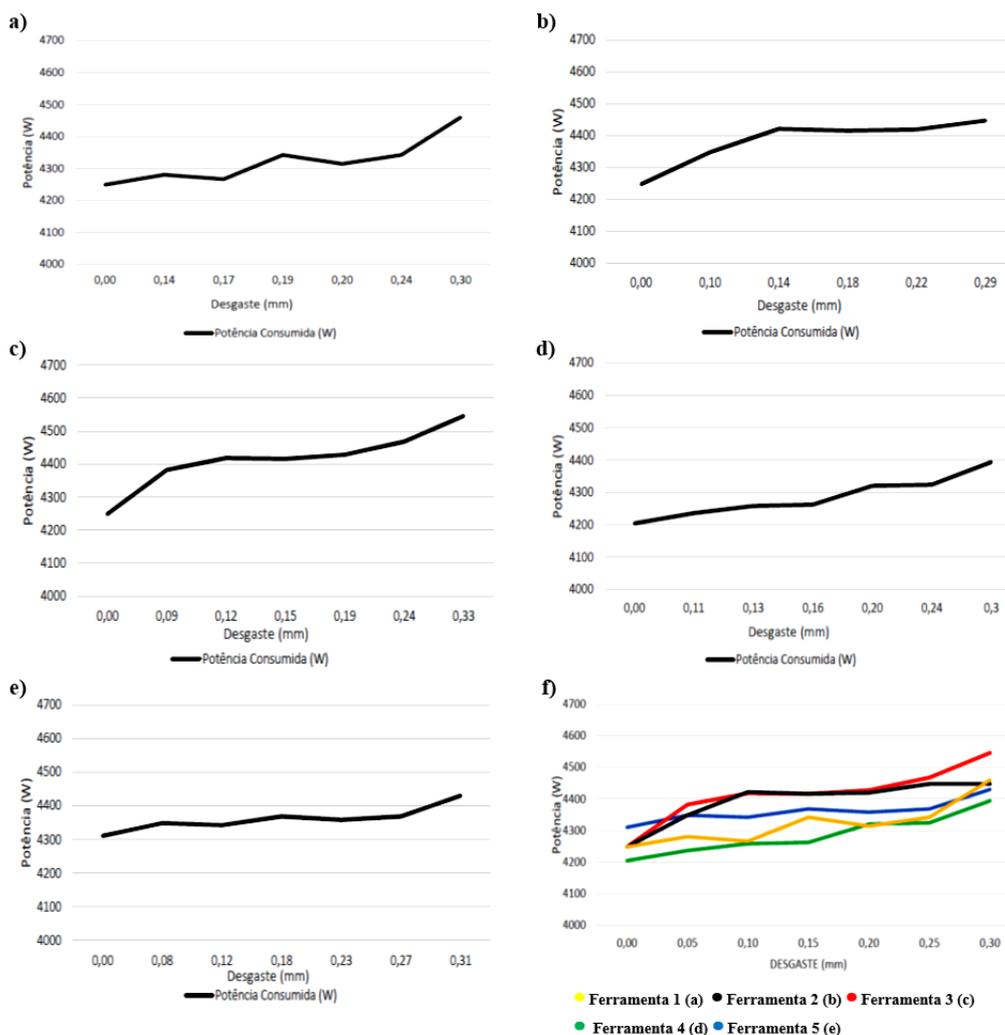


FIGURA 3. Curva de desgaste de flanco médio para as cinco ferramentas testadas e f) sobreposição das respectivas curvas.

Nota-se que durante a usinagem, de maneira geral, conforme o desgaste da ferramenta aumenta, há um aumento na potência consumida pelo equipamento. Este comportamento apresenta conformidade com outros estudos realizado na área [18-20]. Esse aumento na potência ocorre devido à compensação do equipamento que, para realizar a operação de usinagem com uma ferramenta desgastada, realiza mais esforço, solicitando mais corrente no sistema, conseqüentemente aumentando seu consumo de potência. É mostrado na Figura 4 o desgaste de flanco médio, bem com formação de aresta postiça de corte (APC) ocorridos com a Ferramenta 1 ao final da última passada de usinagem.

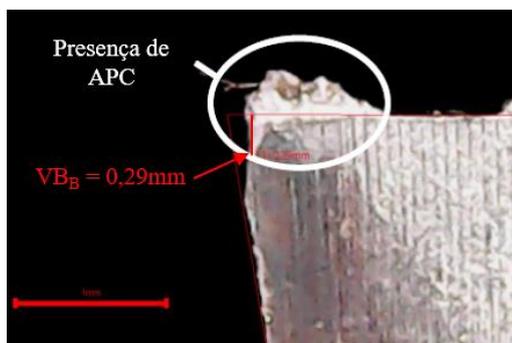


FIGURA 4. Nível de desgaste de flanco médio e APC formadas na Ferramenta 1.

É perceptível a formação de aresta postiça de corte, que pode, por sua vez, acentuar o desgaste da ferramenta, quando este for arrancado da cunha de corte da mesma na continuidade do processo de usinagem, levando consigo material da camada superficial da ferramenta de corte. Ainda, este material que é arrancado tende a provocar desgaste abrasivo nas superfícies de folga e de saída da ferramenta, intensificando o seu desgaste. Este fato, provavelmente, ocorreu com a Ferramenta 2 após a segunda passada de usinagem, conforme mostrado na Figura 5.



FIGURA 5. Desgaste de flanco médio observado na Ferramenta 2 após a APC ser arrancada no decorrer do processo de usinagem.

Nota-se que há a presença de material da peça depositado na superfície de saída da ferramenta. Provavelmente, no decorrer do processo tenha ocorrido a formação de aresta postiça de corte depositada na região da cunha de corte da ferramenta e a mesma ter sido arrancada depois de certo tempo, caracterizando o mecanismo de desgaste por aderência e arrastamento (*attrition*). Desta forma, foi favorecido o aumento do desgaste de flanco e ainda foi deixado material da peça aderido à ferramenta. Nota-se, na Figura 3a, que em alguns momentos, mesmo com o aumento do desgaste, a potência consumida apresenta valores praticamente constantes, mas de maneira geral seu valor sempre se apresenta maior que o início da usinagem.

Essa variação deve-se, justamente, a presença de APC, afetando diretamente na força de usinagem. Variação semelhante também pode ser observada na curva de desgaste da Ferramenta 3 (Figura 3c).

Durante o processo de usinagem com a Ferramenta 4, notou-se um aumento de potência de 4.320,33W para 4324,32W, no intervalo entre os passes 8 e 10, os quais aumentaram o desgaste de flanco médio de 0,20mm para 0,24mm. As medições do desgaste de flanco médio após as passadas de torneamento 4 e 5 estão apresentadas na Figuras 6.

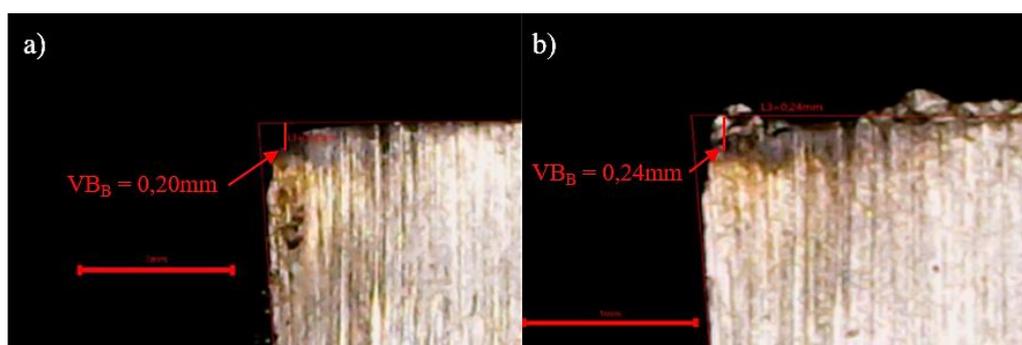


FIGURA 6. Desgaste de flanco médio na Ferramenta 4 após a conclusão das sequências dos passes a) 7 e 8; b) 9 e 10.

Nota-se que na Figura 6a, inicialmente, não há a presença de APC, diferente da Figura 6b na qual, após dois passes de usinagem observa-se, como nas outras ferramentas, a presença de material depositado na ponta da ferramenta e na sua superfície de saída. O fenômeno descrito relaciona-se com a curva de desgaste da ferramenta 04 é mostrada na Figura 3d.

Durante o processo da Ferramenta 4 (Figura 3d) percebeu-se uma variação na potência de, inicialmente, 4204,70W para 4394,10W. Variação maior que para a Ferramenta 5 (Figura 3e), que inicialmente obteve valores

de 4310,36W e finais de 4429,98W. Porém, percebe-se uma variação de potência de 119,62W em relação ao desgaste, se comparado ao observado para as outras ferramentas. Isso deve-se, possivelmente, à variação na rotação do equipamento, pelo fato de que mesmo com o aumento do desgaste da ferramenta, o motor principal do equipamento realiza menos esforços quando há alteração na rotação para se manter a velocidade de corte constante, altera-se, por exemplo, o conjunto de engrenagens na redução do equipamento, solicitando menos esforço do motor e conseqüentemente um consumo menor de energia.

Ao se confrontar as curvas de desgaste das cinco ferramentas testadas (Figura 3f), pode-se identificar um intervalo no qual a potência varia com o desgaste. Através de análise estatística da amostra e, com um intervalo de confiança de 90% (coeficiente 1,64 para IC de 90% multiplicado no intervalo de confiança para média amostral) os dados são detalhados na Tabela 1 e ficam mais evidente na curva de calibração apresentada na Figura 7.

TABELA 1. Análise estatística para os dados de desgaste de flanco médio e potência para a cinco ferramentas testadas.

<i>Desgaste de flanco médio (mm)</i>	<i>Corrente média relacionada (A)</i>	<i>Potência consumida média (W)</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Variância</i>	<i>Intervalo de confiança</i>
0,00	10,66	4252,15	37,68	1419,80	33,03
0,08	10,83	4319,13	59,10	3493,06	43,48
0,12	10,89	4341,46	78,82	6211,83	57,98
0,18	10,94	4361,00	63,56	4039,59	46,75
0,23	10,96	4368,18	53,74	2887,70	39,53
0,27	11,01	4390,11	64,20	4121,87	47,23
0,31	11,17	4455,50	56,17	3154,80	41,32

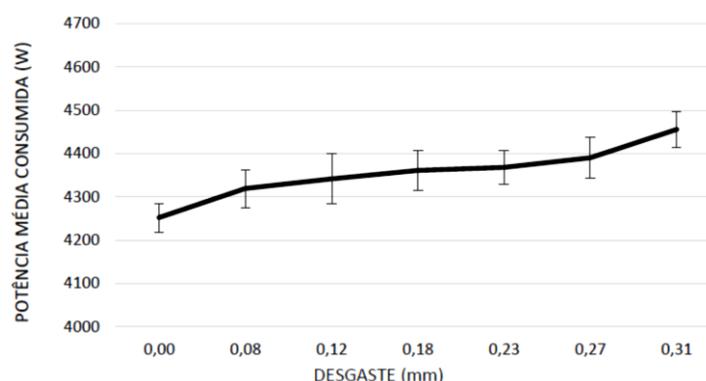


FIGURA 7. Curva de calibração para desgaste de flanco médio e potência média consumida.

Este resultado apresenta conformidade com o observado em estudo prévio [17,20,21], o qual, apesar de captar valores diferentes de potência em seu equipamento, gera uma curva de desgaste da ferramenta bem próxima ao projetado neste trabalho. Ainda, apesar de utilizar ferramentas diferentes de outras pesquisas [16], observa-se além de uma semelhança na curva de desgaste, valores semelhantes de potência captados pelo equipamento e calculados.

3.2 Resultados dos três testes de usinagem para validação da curva de calibração

Para a validação da curva de calibração do desgaste de flanco médio levantada, foram realizados testes com três ferramentas, as quais tiveram como critério de parada uma potência média no passe de 4440W, tendo uma corrente correspondente de 11,15A, com o objetivo de obter um desgaste de flanco de 0,29mm na ferramenta. Os resultados desses testes de validação são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2. Valores das validações do sistema de monitoramento.

<i>Corrente inicial (A)</i>	<i>Corrente final (A)</i>	<i>Corrente média (A)</i>	<i>Potência referente (W)</i>	<i>Desgaste de flanco médio (mm)</i>	<i>Desgaste de referência (mm)</i>	<i>Erro (%)</i>
11,10	11,20	11,15	4445,93	0,28	0,29	3
11,09	11,23	11,16	4449,92	0,27	0,29	7
11,05	11,24	11,15	4443,94	0,33	0,29	14

Nota-se que na Tabela 2 os valores de desgaste de flanco médio se aproximam do desgaste de referência com um erro médio de 8%. Como descrito em outra pesquisa [7], as variações de corrente são pequenas, com média de 0,77% de diferença entre cada passe, o que torna o sistema válido, entretanto, pouco preciso. Durante a etapa de validação, a primeira ferramenta utilizada no sistema apresentou, além do valor de desgaste acentuado, um provável lascamento seguido de entalhe na cunha de corte da ferramenta, como pode ser observado na Figura 8.



FIGURA 8. Fotografia do desgaste de flanco médio da 1ª ferramenta utilizada para a validação apresentando um entalhe.

Constata-se que, a partir deste ponto, caso a usinagem continuasse, possivelmente haveria a quebra da ferramenta com o avanço do lascamento, conforme observado em estudos posteriores [22,23]. Utilizando uma média para os valores de validação e desvio padrão para as três amostras, obtém-se a curva apresentada na Figura 9, com um intervalo de confiança de 90%.

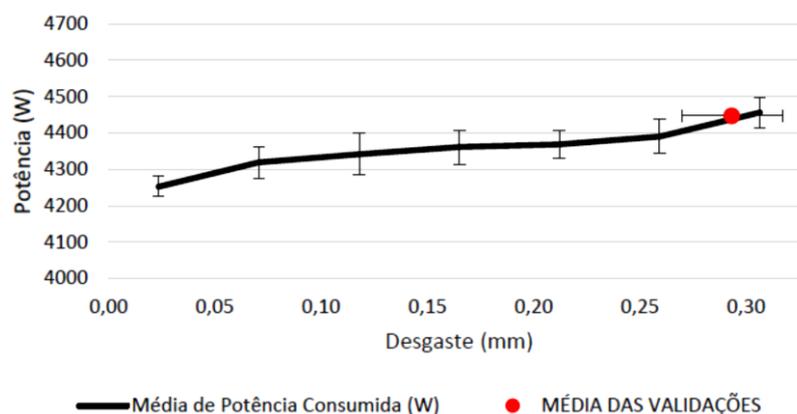


FIGURA 9. Curva de desgaste de flanco médio e média dos valores de validação.

Os valores da média das validações apresentam estatisticamente valores iguais aos da curva de desgaste do sistema, tendo em vista que há intersecção de seus valores no intervalo de confiança. Este resultado apresenta conformidade com estudos anteriores [19,21,24], nos quais métodos de monitoramento e validação semelhantes foram aplicados, validando assim o sistema para seus parâmetros.

4. CONCLUSÃO

Com a análise dos resultados, as seguintes conclusões podem ser destacadas.

- O aparato para o monitoramento do desgaste de flanco da ferramenta montado foi satisfatório para realizar as medições dos desgastes nas ferramentas de aço rápido, bem como para as medições de corrente através do alicate amperímetro as quais geraram os valores de potência.
- Foram obtidos os valores das medições de desgaste de flanco da ferramenta após a usinagem do Aço ABNT 1045, e elaboradas as curvas de desgaste da ferramenta, as quais se mostraram semelhantes a curvas de desgaste já elaboradas em outros trabalhos.
- Foi realizada as validações do sistema de monitoramento obtendo um erro médio de 8% para as medições.
- O sistema de monitoramento apresentou-se válido para o monitoramento do desgaste da ferramenta a partir de dados relacionados a potência consumida pela máquina.

REFERÊNCIAS

- [1] DIMLA, Dimla E.. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, [S.L.], v. 40, n. 8, p. 1073-1098, jun. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955\(99\)00122-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955(99)00122-4).
- [2] DAN, Li; MATHEW, J.. Tool wear and failure monitoring techniques for turning—A review. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, [S.L.], v. 30, n. 4, p. 579-598, jan. 1990. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0890-6955\(90\)90009-8](http://dx.doi.org/10.1016/0890-6955(90)90009-8).
- [3] LIMA, Ramsés Otto Cunha; Vale, Allis Chalmers Nogueira do. Avaliação do desempenho de insertos de metal duro tratados com condicionador de metais no torneamento do aço SAE 1045. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, [S.L.], p. 1-5, 2019. ABCM. <http://dx.doi.org/10.26678/abcm.cobef2019.cof2019-0160>.
- [4] MAIA, C.H.M.; LIMA, R.O. Cunha. Comparative study of surface modification techniques through average flank wear in high speed steel tools coated with thin TiN film. *Surface And Coatings Technology*, [S.L.], v. 366, p. 124-130, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.02.091>.
- [5] LIMA, Ramsés Otto Cunha; ALVES, Clodomiro; MELO, Anderson Clayton Alves de; ALVES, Salete Martins; ARAĐJO FILHO, Lino. New technique for deposition and thermochemical treatment of small parts with complex geometry applied to machining inserts. *Journal Of Materials Research And Technology*, [S.L.], v. 9, n. 6, p. 15811-15823, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.047>.
- [6] LAURO, C.H.; BRANDÃO, L.C.; BALDO, D.; REIS, R.A.; DAVIM, J.P.. Monitoring and processing signal applied in machining processes – A review. *Measurement*, [S.L.], v. 58, p. 73-86, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.035>.
- [7] AMBHORE, Nitin; KAMBLE, Dinesh; CHINCHANIKAR, Satish; WAYAL, Vishal. Tool Condition Monitoring System: a review. *Materials Today: Proceedings*, [S.L.], v. 2, n. 4-5, p. 3419-3428, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.317>.
- [8] SILVA, Rodrigo Henriques Lopes da. Monitoramento do desgaste de ferramenta no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais. 2010. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.
- [9] TÖNSHOFF, H.K.; WULFSBERG, J.P.; KALS, H.J.J.; KÖNIG, W.; VAN LUTTERVELT, C.A.. Developments and Trends in Monitoring and Control of Machining Processes. *Cirp Annals*, [S.L.], v. 37, n. 2, p. 611-622, 1988. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60758-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60758-6).
- [10] MACHADO, Alisson Rocha et al. Teoria da Usinagem dos Materiais. São Paulo: Blucher, 2009.
- [11] SOUTO, Ulisses B. Monitoramento do desgaste de ferramentas no processo de fresamento via emissão acústica. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- [12] DOS SANTOS, M.T. Estudo do Monitoramento do Desgaste de Fresas de Topo Baseado em Emprego de Sensores. 1988, Tese de Doutorado, USP, São Paulo.
- [13] CUPPINI, D.; D'ERRICO, G.; RUTELLI, G.. Tool wear monitoring based on cutting power measurement. *Wear*, [S.L.], v. 139, n. 2, p. 303-311, ago. 1990. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(90\)90052-c](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(90)90052-c).

- [14] TETI, R.; JEMIELNIAK, K.; O'DONNELL, G.; DORNFELD, D.. Advanced monitoring of machining operations. *Cirp Annals*, [S.L.], v. 59, n. 2, p. 717-739, 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.010>.
- [15] SALGADO, D.R.; ALONSO, F.J.. An approach based on current and sound signals for in-process tool wear monitoring. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, [S.L.], v. 47, n. 14, p. 2140-2152, nov. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.04.013>.
- [16] SHAO, H.; WANG, H.L.; ZHAO, X.M.. A cutting power model for tool wear monitoring in milling. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, [S.L.], v. 44, n. 14, p. 1503-1509, nov. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.05.003>.
- [17] AXINTE, D.; GINDY, N.. Assessment of the effectiveness of a spindle power signal for tool condition monitoring in machining processes. *International Journal Of Production Research*, [S.L.], v. 42, n. 13, p. 2679-2691, jul. 2004. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00207540410001671642>.
- [18] CHAVES, B.T.; Casarin, J.J.; Kieckow, F.. Sistema de monitoramento do desgaste de ferramentas de corte em operações de usinagem. In: Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, 21., 2014, Cuiabá. Anais [...]. Cuiabá: CBECIMAT, 2014. p. 3117-3124.
- [19] SILVA, Rodrigo Henriques Lopes da et al. Aplicação de rede neural artificial para monitoramento do desgaste de ferramentas utilizando sinal de emissão acústica e potência de corte. In: congresso brasileiro de engenharia de fabricação, 6., 2011, Caxias do Sul. Anais [...]. Caxias do Sul: ABCM, 2011. p. 1-11.
- [20] CHOUDHURY, S.K.; SRINIVAS, P.. Tool wear prediction in turning. *Journal Of Materials Processing Technology*, [S.L.], v. 153-154, p. 276-280, nov. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.296>.
- [21] CHOUDHURY, S.K.; KISHORE, K.K. Tool wear measurement in turning using force ratio. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, [S.L.], v. 40, n. 6, p. 899-909, maio 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955\(99\)00088-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955(99)00088-7).
- [22] CUNHA LIMA, Ramsés Otto; MELO, Anderson Clayton Alves de. Análise do desgaste e das avarias em insertos de metal duro após o fresamento com ar quente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7., 2013, Penedo. Anais [...]. Penedo: Abcm, 2013. p. 1-10.
- [23] LIMA, Ramsés Otto Cunha; MELO, Anderson Clayton Alves de. Hot Milling: a proposal to minimize thermal cracks formation in cemented carbide tools. Volume 15: Safety, Reliability and Risk; Virtual Podium (Posters), [S.L.], p. 1-8, 15 nov. 2013. American Society of Mechanical Engineers. <http://dx.doi.org/10.1115/imece2013-62092>.
- [24] SHARMA, Vishal S.; SHARMA, S. K.; SHARMA, Ajay K.. Cutting tool wear estimation for turning. *Journal Of Intelligent Manufacturing*, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 99-108, 3 jul. 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-007-0048-2>.