v7.n7.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS DE TORNEAMENTO

DEVELOPMENT OF AN APPLICATION FOR SIMULATION AND OPTIMIZATION OF TURNING PROCESSES

DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA LA SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE TORNEADO

David William dos Santos, Amauri Hassui

e778352
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i7.8352

PUBLICADO: 07/2026

RESUMO

Ao longo do tempo diferentes materiais foram usados como matéria-prima, passando por materiais simples como a madeira até chegar às ligas metálicas mais complexas, as quais são constantemente desenvolvidas e demandam processos de fabricação que possibilitem a produção de peças com resultados competitivos. É neste contexto que o presente trabalho foi elaborado, tendo como proposta o desenvolvimento de um aplicativo para computador escrito na linguagem *Python* e que tem como objetivo auxiliar o desenvolvimento de novos processos de torneamento além da otimização de processos existentes. O aplicativo possui modelos matemáticos elaborados a partir de fórmulas consagradas na literatura. Algumas funções foram testadas de forma controlada em um ambiente fabril, os resultados previstos pelo aplicativo foram comparados a valores obtidos em testes práticos e a valores disponibilizados por documentos fornecidos por fabricantes de ferramentas, onde se constatou que os resultados apresentaram boa precisão. Foram feitos testes para a previsão da vida útil da ferramenta em função da velocidade de corte, a qual pôde ser estimada com precisão de cerca de 87,53%. Os resultados obtidos têm caráter preliminar, pois a usinagem abarca um grande universo de variáveis, sendo necessários diversos testes para comprovar a eficiência plena do aplicativo.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização de usinagem. Simulação de torneamento. Desenvolvimento de processos.

ABSTRACT

Over time, a variety of materials have served as raw materials ranging from simple ones like wood to complex metal alloys requiring manufacturing processes that yield competitive results. It is against this backdrop that the present work was developed, proposing a computer application written in Python designed to assist in developing new turning processes and optimizing existing ones. The application incorporates mathematical models based on formulas well-established in the literature. Certain functions underwent controlled testing in a manufacturing environment; results predicted by the application were compared against values obtained from practical tests and data provided by tool manufacturers, revealing a high level of accuracy. Tests were conducted to predict tool life based on cutting speed, which was estimated with an accuracy of approximately 87.53%. These results are preliminary in nature, as machining involves a vast array of variables, necessitating further testing to fully validate the application's efficiency.

KEYWORDS: *Machining optimization. Turning simulation. Process development.*

RESUMEN

A lo largo del tiempo, se ha utilizado una gran variedad de materiales desde opciones simples como la madera hasta complejas aleaciones metálicas, lo que exige procesos de fabricación

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

capaces de ofrecer resultados competitivos. En este contexto se ha desarrollado el presente trabajo, que propone una aplicación informática escrita en Python diseñada para asistir en el desarrollo de nuevos procesos de torneado y en la optimización de los ya existentes. La aplicación incorpora modelos matemáticos basados en fórmulas ampliamente consolidadas en la literatura técnica. Se sometieron determinadas funciones a pruebas controladas en un entorno de fabricación; los resultados predichos por la aplicación se compararon con valores obtenidos en ensayos prácticos y con datos facilitados por los fabricantes de herramientas, demostrando un alto grado de precisión. Se realizaron pruebas para predecir la vida útil de la herramienta en función de la velocidad de corte, lográndose una precisión estimada de aproximadamente el 87,53 %. Estos resultados tienen carácter preliminar, dado que el mecanizado implica una amplia gama de variables, por lo que será necesario realizar más pruebas para validar plenamente la eficacia de la aplicación.

PALABRAS CLAVE**:** *Optimización del mecanizado. Simulación de torneado. Desarrollo de procesos.*

INTRODUÇÃO

Na Idade da Pedra o homem criou os processos de fabricação para poder produzir ferramentas necessárias à sua sobrevivência, conforme a humanidade se desenvolveu houve um aumento progressivo nas exigências de conforto e consumo fazendo com que máquinas e equipamentos fizessem parte do cotidiano. (Araújo *et al.*, 2020).

Dentre os processos de fabricação há grande destaque para a usinagem, que segundo a ABNT (2015) é o conjunto de processos mecânicos que visa obter formas e dimensões específicas a partir da remoção de material.

Com a Revolução Industrial, a madeira que até então era o principal material usado na Engenharia deu lugar a materiais novos e mais resistentes, o que impulsionou o desenvolvimento de aços-liga como ferramentas de corte. (Machado *et al.*, 2015). Segundo Trent e Wright (2000) as primeiras máquinas a vapor usavam materiais de usinagem relativamente fácil, ferro fundido, latão e bronze, estes materiais podiam ser usinados com ferramentas de aço carbono temperado. Ferraresi (1970) conta que em 1898 houve importantes esforços para obter aços para a fabricação de ferramentas que permitissem a usinagem em condições mais severas e no ano de 1903 foi desenvolvido um protótipo dos aços rápidos. Posteriormente foram criadas as ferramentas de metal duro, que segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2022) é um produto feito a partir da combinação de partículas duras, os carbonetos de tungstênio (WC) usualmente combinado com outros elementos e que são unidos por meio de um metal aglomerante, geralmente o cobalto (Co). Ainda segundo os autores o metal duro oferece uma relação de compromisso entre dureza em altas temperaturas e tenacidade.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

As evoluções contínuas da indústria e da engenharia desencadeiam uma demanda por materiais que tenham características que os façam suportar as condições previstas no projeto, desta forma, novos materiais são desenvolvidos ao longo do tempo.

Surge então a necessidade de desenvolver processos de torneamento capazes de fabricar peças a partir destes materiais, sendo necessário determinar os parâmetros do processo, bem como o tipo de ferramenta e a estratégia de usinagem.

A partir dessas informações fica evidente que o ser humano busca constantemente melhorar os processos de usinagem utilizados e com isso há a necessidade de se encontrar as condições de corte adequadas.

Pereira e Simonetto (2018) mencionam que ao longo de cerca de 200 anos a indústria passou por três revoluções, a primeira teve como característica o uso das máquinas a vapor e a centralização dos processos produtivos em fábricas, a segunda pela adoção das linhas de produção e a terceira foi marcada pelo advento do controlador lógico programável, com o qual é possível fazer uso de sistemas digitais. Ainda segundo os autores, em 2011 foi cunhado o termo Indústria 4.0, que se refere à quarta revolução industrial, fundamentada em tecnologias como a *Internet* das coisas e que permite a integração entre humanos e máquinas, trazendo mudanças que podem afetar o processo produtivo em diversos níveis.

Atualmente a competitividade faz com que as empresas busquem reduzir o tempo de lançamento de seus produtos no mercado, com isso, tem-se recorrido aos chamados gêmeos digitais, que são modelos virtuais dos produtos em desenvolvimento (Schleich et al., 2017).

O uso de gêmeos digitais tem como objetivo replicar uma entidade física, seja ela um produto ou um processo industrial de forma exata, usando modelagem, simulações e *big data* (Mussomeli *et al.*, 2018).

O desenvolvimento de novos produtos que podem, inclusive, demandar o uso de materiais novos associado à competitividade que acontece a nível global faz com que as empresas busquem desenvolver e otimizar processos de usinagem com resultados que as possibilite fazer parte do mercado. O problema é que se faz necessário determinar os parâmetros adequados a serem usados durante o processo, além de lidar com dificuldades que podem surgir ao longo do desenvolvimento deste, se tudo isso for feito por tentativa e erro pode ser demorado e oneroso.

O presente trabalho analisa a possibilidade de se desenvolver um aplicativo para simular o comportamento de processos de torneamento, além de determinar propriedades mecânicas de materiais em usinagem e das ferramentas usadas. O objetivo do aplicativo é apoiar o desenvolvimento e a otimização de processos de torneamento buscando a máxima produtividade

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ou o menor custo de produção possível, dadas as limitações deste processo. O aplicativo permitirá que se possam realizar simulações com diferentes parâmetros de corte até atingir os resultados esperados e então partir para a usinagem real e fazer os ajustes necessários, além de permitir a obtenção de propriedades importantes do material a ser usinado e das ferramentas usadas.

Com o uso deste aplicativo é esperado obter resultados que contribuam para a redução do custo de fabricação de peças e do tempo de desenvolvimento de processos o que ajudaria a impulsionar a criação de produtos usinados, além de uma redução no custo total para o desenvolvimento do processo, o que tornaria as empresas mais competitivas.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

A usinagem de metais é um processo que envolve diversos fenômenos, apresentando grande diversidade de variáveis, fazendo com que a determinação dos parâmetros do processo seja uma atividade complexa e muitas vezes iterativa. Desenvolver um aplicativo capaz de modelar matematicamente o processo de torneamento certamente proporcionará agilidade ao permitir a rápida simulação de condições e a predição de propriedades que são difíceis de obter por consulta direta.

1.1. Parâmetros de corte no torneamento

Segundo Machado *et al.* (2015), o torneamento é um processo pelo qual se obtém peças com geometria cilíndrica a partir da remoção de material por uma ferramenta que realiza movimentos nas direções transversal e longitudinal.

A Velocidade de corte (V_c) é velocidade instantânea tomada como referência a aresta de corte da ferramenta, ela depende da rotação da peça (n) e do diâmetro da peça (d) (Machado *et al.*, 2015). Ainda segundo o autor a Velocidade de corte pode ser obtida pela equação 1:

$$V_c = \frac{n \,.\, d \,.\, \pi}{1000} \quad [1]$$

Onde:

V_c (m/min.)

n(rpm)

d(mm)

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A profundidade de corte (a_p) especifica quanto material a ferramenta remove em cada passe, medida de forma perpendicular ao plano de trabalho, o avanço por rotação (f) indica quanto a ferramenta se desloca linearmente ao longo do eixo longitudinal a cada volta da peça. (Diniz, Marcondes e Coppini, 2022)

1.2. Força de corte e potência de corte

Durante a usinagem de uma peça surgem forças na ferramenta as quais apresentam intensidade e direções diferentes, dentre elas, podemos citar a Força de corte (F_c) medida em N, cuja direção está alinhada à direção do corte e cujo módulo depende das propriedades do material e dos parâmetros de corte, conforme mostra a equação 2 (Diniz, Marcondes e Coppini, 2022).:

$$F_c = K_s . A \quad [2]$$

Onde:

K_s: Pressão específica de corte (N/mm²)

A: Área da secção do corte (mm²)

Segundo Ferraresi (1970), a área de corte pode ser determinada pela equação 3:

$$A = b . h \quad [3]$$

Onde b é a largura de corte, dada em mm, sendo definida pela expressão 4 (Diniz, Marcondes e Coppini, 2022):

$$b = \frac{a_p}{sen\chi r} \quad [4]$$

Onde:

χr: É o ângulo de posição, formado entre a face da ferramenta e o eixo longitudinal

Ainda segundo os autores, o parâmetro h se refere à espessura de corte, também medida em mm e que pode ser calculada pela equação 5:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

$$h = f.\text{sen}\chi r$$

[5]

A potência de corte (P_c) pode ser calculada multiplicando-se a força de corte pela velocidade de corte, a equação 6 é uma adaptação da fórmula mencionada por Ferraresi (1970), onde o denominador foi multiplicado por 10³ para que se obtenha o resultado em kW:

$$P_c = \frac{F_c \, x \, V_c}{60 \, x \, 10^3}$$

[6]

1.3. Ferramentas para o torneamento

Existem diversas opções de materiais para as ferramentas, para escolher é preciso levar em consideração algumas características, por exemplo: Material a ser usinado, características específicas do processo de usinagem tais como a estabilidade e a resistência da ferramenta, condições da máquina operatriz, formas e dimensões da ferramenta, além dos custos envolvidos com o processo. Dentre os materiais utilizados pode-se citar o metal duro, que é obtido a partir da sinterização de partículas duras com metais como ferro (Fe), níquel (Ni) ou cobalto (Co) e que também podem receber uma camada de cobertura. (Diniz, Marcondes e Coppini, 2022).

1.4. Desgaste e avarias de ferramentas no torneamento

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2022), uma ferramenta está sujeita a vários tipos de desgastes e avarias, sendo que no desgaste há uma perda contínua e relativamente lenta de partículas da ferramenta, já a avaria pode ser um processo brusco. Ainda de acordo com os autores há diversos tipos, os desgastes do tipo frontal, de entalhe e de cratera são causados basicamente pelo atrito do material da peça com a ferramenta, já a deformação plástica da aresta de corte ocorre devido à combinação de alta temperatura e pressão atuando sobre a aresta, o que faz com que esta se deforme. O lascamento e as trincas são considerados tipos de avaria, pois são danos que ocorrem de forma súbita. Por último, a ferramenta pode vir a se quebrar, tornando-se inutilizada.

1.5. Tempo de vida da ferramenta

Segundo Ferraresi (1970), a vida da ferramenta é o tempo que uma aresta de corte trabalha efetivamente até que se atinjam valores críticos de desgaste, ainda segundo o autor,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Taylor deduziu uma função do tempo de vida da ferramenta em relação à Velocidade de corte, a qual pode ser vista na equação 7, onde K e x são parâmetros determinados experimentalmente:

$$T = K \cdot V_c^{-x} \quad [7]$$

1.6. Condições econômicas de usinagem

Diniz, Marcondes e Coppini (2022) apontam que o uso de velocidades de corte abaixo de um valor crítico pode levar a um fenômeno chamado de formação de aresta postiça de corte, quando isso ocorre há um elevado desgaste de flanco na ferramenta. Uma velocidade de corte ligeiramente superior à velocidade de corte crítica provoca desgastes pequenos, no entanto, o tempo de corte será elevado e a produtividade baixa, visto que a operação de usinagem será lenta. Mas se a velocidade de corte for demasiado alta os desgastes também serão altos, o que implicará em vida útil curta para a ferramenta, acarretando maiores custos visto que a ferramenta terá menor duração, ainda há de se ressaltar que uma vida útil curta implica em substituições frequentes, o tempo de troca da ferramenta se soma aos demais tempos do processo aumentando o tempo total deste. Existe um valor de velocidade de corte que está acima da velocidade crítica (onde haveria formação de aresta postiça) e uma velocidade muito superior a esta onde se obteria os menores custos de produção, esta velocidade é chamada de velocidade de mínimo custo (V_{co}). Há também outro valor de velocidade de corte dentro do referido intervalo onde se tem o menor tempo total de fabricação de uma peça, essa velocidade é chamada de velocidade de corte de máxima produção (V_{cmxp}). Antes de abordar as fórmulas para se determinar as velocidades acima descritas é necessário conceituar as etapas que compõem um ciclo de usinagem, ainda segundo os autores tem-se:

t_t: Tempo total de usinagem de uma peça;

t_c: Tempo de corte;

t_s: Tempo secundário (Fixação da peça, inspeção e retirada da peça da máquina);

t_a: Tempo de aproximação e afastamento da ferramenta de corte;

t_p: Tempo de preparação da máquina;

t_{ft}: Tempo de troca da ferramenta;

O tempo total médio de usinagem de uma peça pertencente a um lote de q peças é dado pela equação 8:

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{q} + \frac{N_t}{q} \cdot t_{ft} \quad [8]$$

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Onde:

N_t : Número de trocas de ferramenta durante a usinagem do lote.

Também é importante elencar os custos envolvidos na usinagem:

K_p: Custo de produção por peça;

K_{us}: Custo da mão-de-obra de usinagem;

K_{uf}: Custo das ferramentas;

K_{um}: Custos relativos à máquina;

A velocidade de corte de mínimo custo pode ser calculada a partir da equação 9 (extraída de Diniz, Marcondes e Coppini, 2022):

$$V_{co} = \sqrt[x]{\frac{C_2 .K}{60 .(x-1).C_3}}$$

[9]

Onde:

x: expoente da equação de Taylor para vida da ferramenta;

C_2: Soma das despesas com mão-de-obra e máquina ($/hora);

C_3: Constante de custo relativo à ferramenta;

K: Constante da equação de Taylor para vida da ferramenta;

Já a velocidade de corte para máxima produção é mostrada na equação 10 (extraída de Diniz, Marcondes e Coppini, 2022):

$$V_{cmxp} = \left(\frac{K}{(x-1).t_{ft}}\right)^{1/x}$$

[10]

1.7. Programação na linguagem Python

Segundo a *Python Software Foundation* (2026), o *Python* é uma linguagem de programação interpretada, interativa e orientada a objetos que incorpora tipagem dinâmica, módulos, exceções, classes e tipos de dados dinâmicos de alto nível, fornecendo ao desenvolvedor um poder notável e uma sintaxe simples. O *Python* possui interfaces para muitas bibliotecas, é portátil e pode ser rodado em diversos sistemas operacionais.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho tem caráter de Desenvolvimento Tecnológico, objetivando o desenvolvimento de uma ferramenta computacional. Inicialmente foi feito um mapeamento das variáveis presentes no processo de torneamento, a seguir buscaram-se na literatura as fórmulas que permitem o cálculo destas variáveis bem como o relacionamento entre estas. Uma vez concluído o aplicativo, passou-se à etapa dos testes a fim de se verificar a precisão dos resultados obtidos. Todos os testes foram repetidos a fim de se evitar erros e vieses e obter resultados consistentes. Os protocolos de testes serão descritos ao longo desta seção. Foram testadas as funções que calculam os parâmetros para a determinação da vida útil da ferramenta em função da velocidade de corte e a função que permite medir a pressão específica de corte e coeficiente de Kienzle do material usinado. Durante os testes as variáveis foram coletadas diretamente no painel indicador do torno CNC usado nos testes, além da coleta de tempo que foi feita por um cronômetro digital. O teste para determinação da vida útil da ferramenta foi feito a partir da observação direta do tempo de duração desta uma vez estabelecido um critério para o fim de vida, já a obtenção da pressão específica de corte e do coeficiente de Kienzle foi feita de forma indireta, tendo seu valor calculado de acordo com as condições de corte usadas e da potência de corte observada. Vale ressaltar que o torno CNC possui perdas provenientes de seus mecanismos, e as medições apresentadas em seu painel também podem possuir imprecisões, ambas podem interferir nos resultados do aplicativo.

2.1. Simulação de processos

Durante o desenvolvimento do aplicativo buscou-se construir um modelo matemático que representasse o comportamento de variáveis de processo de acordo com parâmetros de usinagem informados. Com estes dados é possível fazer simulações do processo até que se obtenha o resultado esperado, após a simulação os dados podem então ser usados no processo para que se possa proceder com ajustes nos parâmetros.

O programa possui um dicionário que correlaciona os parâmetros de pressão específica de corte (K_{s1}) e o expoente de Kienzle (mc) para alguns materiais cujos valores foram encontrados na literatura.

Com base nesses dados é possível estimar a força de corte bem como a potência de corte, informações importantes no momento de se avaliar se o sistema de fixação da peça e da ferramenta está adequado e se a máquina tem a potência necessária para a realização da usinagem. O usuário precisa informar os parâmetros de corte que pretende usar, além de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

informações sobre a peça e sobre o processo. Através da informação do diâmetro externo bruto, do diâmetro acabado e da profundidade de corte pode-se calcular a quantidade de passes necessários para a realização da operação de desbaste, a fórmula utilizada para este cálculo é mostrada na equação 11:

$$np = \frac{(D_i - D_f)}{2 \,.\, a_p} \quad [11]$$

Onde:

np: Quantidade de passes necessários;

D_i: Diâmetro inicial (bruto);

D_f: Diâmetro final;

Em caso de números não inteiros o resultado é sempre arredondado para cima.

Uma vez informados o diâmetro bruto e o diâmetro final, também se pode calcular a rotação média ao longo do processo utilizando a equação 12:

$$n = \frac{V_{c\,.1000}}{\frac{(D_i - D_f)}{2}.\pi} \quad [12]$$

Informando-se o comprimento a ser usinado, o tempo total de corte é calculado usando-se a equação 13, onde l é o comprimento de corte, f e n são o avanço por rotação e a rotação da placa do torno, respectivamente.

$$t_c = \frac{l}{f_{x\,n}} \quad [13]$$

Nota: t_c está expresso em minutos.

A força de corte foi calculada a partir da equação 14, que é um desenvolvimento da equação 2 (extraída de Diniz, Marcondes e Coppini, 2022):

$$F_c = K_{s1} \,.\, \frac{a_p}{sen\chi_r} \,.\, \left(f \,.\, sen\chi_r\right)^{1-mc} \quad [14]$$

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Nota: F_c está expresso em N.

A potência de corte foi obtida a partir da equação 6, mencionada no tópico anterior:

Com base no material, tipo de corte (contínuo ou interrompido) e índice de esbeltez da peça o programa faz uma sugestão da ferramenta a ser utilizada, informando a geometria e classe ISO do inserto.

2.2. Estimativa da rugosidade

A rugosidade resultante pode ser estimada a partir da equação 15 (extraída de Diniz, Marcondes e Coppini, 2022):

$$R_{max} = \frac{f^2}{8re} \quad [15]$$

Onde:

r_e = raio de ponta da ferramenta (mm)

2.3. Determinação das propriedades K_{s1} e mc do material

A determinação dos parâmetros K_{s1} e mc é feita a partir de informações coletadas diretamente no painel do torno CNC durante a usinagem de um corpo de prova (que pode inclusive ser uma peça em produção) no qual são realizados dois passes a diferentes avanços. O procedimento é o seguinte:

1º Informa-se ao aplicativo a potência nominal do motor principal do torno (responsável pela rotação do eixo árvore);

2º Fixa-se o corpo de prova na placa do torno;

3º Liga-se o torno com a velocidade de corte, profundidade de corte e avanço já definidos;

4º Anota-se o valor de potência consumida em vazio (sem que a ferramenta toque a peça);

5º Inicia-se a usinagem (apenas um passe);

6º Anota-se o valor de potência consumida durante a usinagem assim que este valor estabilizar;

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O procedimento acima é então repetido, mas desta vez usa-se um avanço diferente. O objetivo é determinar a potência consumida durante a usinagem para uma condição de corte específica, a única diferença entre a primeira e a segunda operação é a velocidade de avanço. Inicialmente calcula-se a potência consumida pelo torno deduzindo-se o valor da potência em vazio da potência medida durante a usinagem:

$$P_e = P_m - P_o \quad [16]$$

P_e: Potência efetiva (%);

P_m: Potência consumida durante a usinagem do corpo de prova (%);

P_o: Potência consumida em vazio (%);

IMPORTANTE: O torno CNC informa a potência consumida na forma de um percentual da potência nominal do motor principal.

A potência efetiva em kW é então calculada multiplicando-se o valor calculado pela equação 16, que é dada em porcentagem pela potência nominal do motor principal do torno. Após a usinagem do corpo de prova é possível obter dois conjuntos de informações, sendo cada conjunto composto por potência de corte, velocidade de corte, profundidade de corte e avanço. Sabendo-se os valores da potência de corte e da velocidade de corte é possível calcular a força de corte. Os valores de mc e K_{s1}são então calculados com base na variação da força de corte em função da variação do avanço.

2.4. Determinação dos parâmetros da equação de Taylor para a vida da ferramenta

Inicialmente deve-se determinar um critério para o fim de vida da ferramenta, após essa definição é necessário que se façam testes. Cada teste deve ter os mesmos valores de profundidade de corte (a_p) e avanço (f). É muito importante utilizar uma aresta nova para cada teste.

Após definido o critério de fim de vida da ferramenta faz-se três testes, usinando-se corpos de prova até que a ferramenta atinja o critério de fim de vida, é importante que cada um dos testes seja feito a uma diferente velocidade de corte. Ao fim dos testes haverá três pares de informações V_c e T. O valor do expoente x da equação de Taylor (equação 7) é calculado a partir da razão entre o par de informações dos testes 1 e 2 e a partir da razão entre o par de informações dos testes 2 e 3, desta forma, obtém-se dois valores para a constante x, o valor final

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

é a média destes dois valores. Após calcular o valor de x também é calculado o valor da constante K.

2.5. Determinação das condições econômicas de usinagem

O cálculo das condições econômicas de usinagem se inicia com a informação do tempo de troca de ferramenta (t_{ft}) que pode ser cronometrado diretamente no chão de fábrica.

Além dos tempos, também é necessário ter algumas informações relativas ao custo do processo:

K_{us}: Custo da mão-de-obra de usinagem: Custo gerado por hora decorrente aos gastos com mão-de-obra, incluindo salários, benefícios etc.;

K_{um}: Custos relativos à máquina: Custo gerado por hora relativo aos gastos da máquina, tais como depreciação, custos rateados etc.;

K_{ee}: Custo da energia elétrica: Custo médio do kWh;

K_{uf}: Custo das ferramentas: Neste caso, considera-se o custo por aresta da ferramenta;

Para o cálculo da velocidade de corte de máxima produção, usou-se a equação 10:

Uma vez definidos os valores de t_{ft}, que pode ser medido, e dos parâmetros K e x, que podem ser obtidos experimentalmente com o uso do aplicativo em questão, pode-se chegar ao valor da Velocidade de corte de máxima produção.

Já a velocidade de mínimo custo foi calculada a partir da equação 9:

Os valores de K e x podem ser informados diretamente, se conhecidos, ou determinados experimentalmente a partir do próprio aplicativo, o parâmetro C_2 pode ser calculado a partir da soma dos custos de mão-de-obra e custos da máquina, ambos calculados na forma de um gasto médio por hora, conforme a equação 17:

$$C_2 = K_{us} + K_{um} \quad [17]$$

Já o valor de C_3 é o custo de cada aresta da ferramenta (K_{uf}), para obtê-lo basta dividir o custo da ferramenta pela quantidade de arestas utilizáveis.

2.6. Protocolo de testes

Os testes consistem basicamente em usinar corpos de prova, observar variáveis tais como: potência consumida e tempo de duração da aresta de corte, informar estes valores ao aplicativo e calcular os parâmetros pretendidos. Foram utilizados dois materiais diferentes, sendo

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

um corpo de prova fabricado em aço carbono ABNT 1045 trefilado e outro fabricado em aço carbono laminado ABNT 4140 temperado e revenido.

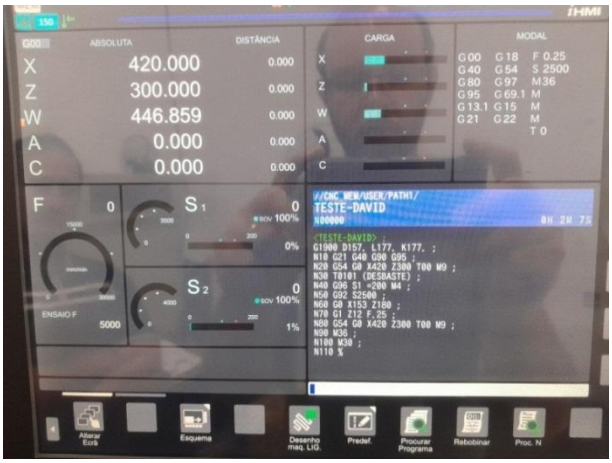
Todos os testes foram feitos em um torno CNC da marca Romi, modelo G300M, o qual oferece uma interface que mostra a porcentagem da potência do motor principal que está sendo usada durante a usinagem. A figura 1 mostra o painel do torno com seus indicadores. Este torno possui um motor principal com potência de 18,5 kW. Durante os testes foram desprezadas as perdas provenientes dos mecanismos do torno. Foram feitos dois tipos de testes diferentes, sendo eles:

TESTE 1 - Determinação da pressão específica de corte e do coeficiente de Kienzle do material dos corpos de prova;

TESTE 2 - Determinação dos parâmetros da equação de Taylor para a vida útil da ferramenta em função da velocidade de corte;

Os protocolos de teste são mostrados a seguir.

Figura 1. Painel do torno CNC, o parâmetro S1 se refere à porcentagem da potência consumida



TESTE 1:

1 - Ajusta-se o torno para usinar com os parâmetros V_c= 200, ap =1,5 e f = 0,25;

2 - Com a peça devidamente fixada o torno é ligado e aguarda-se até que a rotação estabilize;

3 - Observa-se a potência consumida em vazio e anota-se este valor;

4 - Inicia-se a usinagem aguardando até que o valor da potência consumida estabilize para ser anotado;

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

5 - Após a conclusão do passe, troca-se a ferramenta (usando uma aresta nova da mesma ferramenta) e então se repetem os passos 2, 3 e 4;

6 - Troca-se novamente de aresta da ferramenta e então se repete os passos de 2 a 5, mas dessa vez com f = 0,15;

TESTE 2:

Uma vez definido o critério de fim de vida da ferramenta como sendo o aparecimento de "fagulhas", o que evidencia a deterioração da aresta e o aumento de 3% na potência consumida:

1 - Ajusta-se o torno para usinar com os parâmetros V_c= 250, ap =1,5 e f = 0,25;

2 - Com a peça devidamente fixada o torno é ligado e inicia-se a usinagem, o cronômetro é iniciado apenas quando a ferramenta toca a peça;

3 - Ao atingir o final de vida da ferramenta anota-se o tempo decorrido e a usinagem é interrompida;

4 - Troca-se de aresta e repete-se os passos 2 e 3

Importante: o cronômetro somente é iniciado quando a ferramenta toca efetivamente a peça.

5 - Troca-se novamente a aresta de corte;

6 - Ajusta-se o torno para usinar com os parâmetros V_c= 300, ap =1,5 e f = 0,25 e repete-se os passos 2, 3 e 4;

7 - Troca-se novamente a aresta de corte;

8 - Ajusta-se o torno para usinar com os parâmetros V_c= 350, ap =1,5 e f = 0,25 e repete-se os passos 2, 3 e 4;

Durante os testes não foi usado fluido de refrigeração, para o teste de número 1 foi utilizado um inserto intercambiável, com geometria TNMG 160408 e classe P25, trabalhando em um ângulo de posição de 90 graus. Para o teste dois foi usado um inserto com geometria TNMG 160404 e classe P15, trabalhando em um ângulo de posição de 90 graus

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

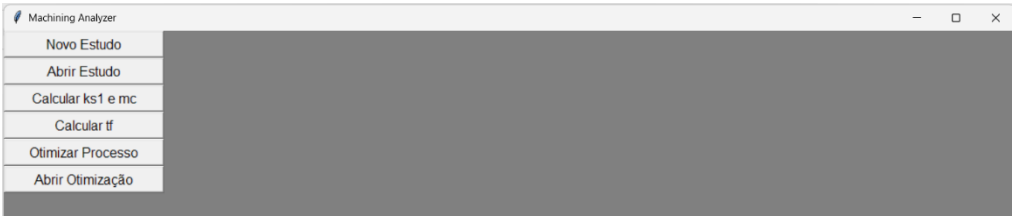
3.1. Aspectos do aplicativo

As figuras a seguir mostram as telas de interface do aplicativo, começando com a tela inicial a qual apresenta as funcionalidades ao se iniciar um novo estudo de usinagem, que pode ser de desbaste externo ou desbaste interno. Também há a funcionalidade que permite o cálculo dos parâmetros K_{s1} e mc (Equação de Kienzle) com base em amostras coletadas diretamente no chão de fábrica. A função Calcular tf permite que se definam os parâmetros da equação de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

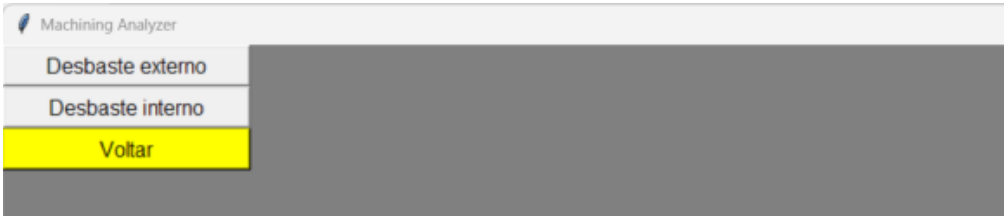
Taylor para a vida da ferramenta em função da velocidade de corte. Por último, há a função Otimizar Processo que permite encontrar as velocidades de corte econômicas e calcular o custo da peça produzida.

Figura 2. Tela inicial do aplicativo com as funcionalidades oferecidas



Ao se clicar na opção “Novo Estudo”, uma nova tela é aberta oferecendo as opções para se realizar um estudo com desbaste externo ou desbaste Interno.

Figura 3. Opções do estudo de usinagem



Uma vez definido o tipo de desbaste que se pretende analisar é mostrada uma tela onde se podem informar os parâmetros de corte e o material a ser usinado para então realizar simulações baseadas em modelos numéricos.

Na figura 4 mostra-se o resultado de um estudo simulando a usinagem de uma peça com diâmetro externo bruto de 100mm e que é feita de aço ABNT 1045. Nessa simulação foi considerado que a peça seria torneada até que se obtenha a medida de 80mm em um comprimento de 200mm, utilizando-se Velocidade de corte de 250 m/min., profundidade de corte de 1,5mm e avanço de 0,25 mm/rot., além de se considerar que a ferramenta tem um raio de ponta de 0,8mm e um possui um ângulo de posição de 90 graus. Uma vez informados estes valores o aplicativo calcula o tempo de corte, a força de corte, a potência de corte, faz uma estimativa da rugosidade e também sugere uma ferramenta com base nas informações de tipo de corte e índice de esbeltez da peça. Os valores encontrados foram validados por meios dos cálculos encontrados na literatura específica. A figura 4 mostra os resultados calculados pelo aplicativo.

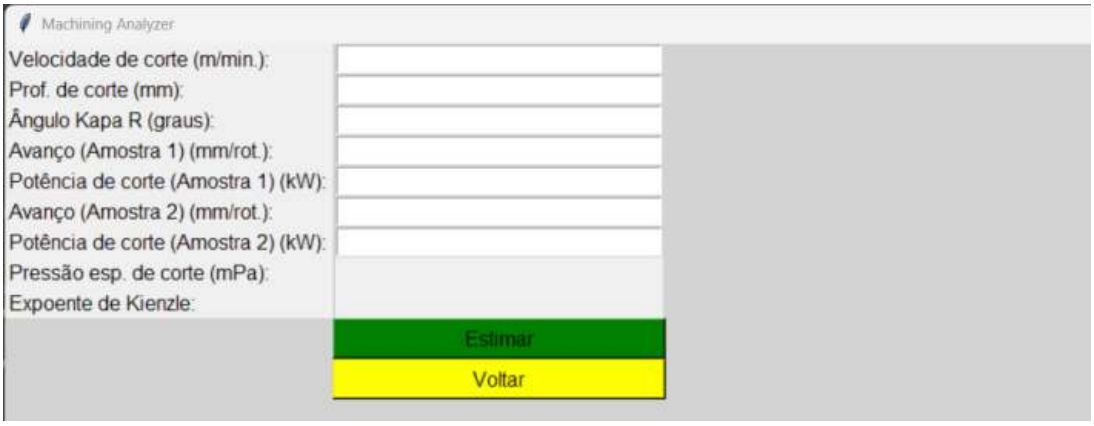
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 4. Resultados da simulação feita



A tela da função “Calcular K_{s1} e mc” é mostrada na figura 5, uma vez informados os dados coletados o aplicativo então calculará os valores de K_{s1} e mc, fundamentais para os cálculos de força de corte, potência de corte e para a determinação das velocidades de corte econômicas. Esta função tem sua utilidade quando se está usinando um material com propriedades desconhecidas.

Figura 5. Tela da função para determinação dos valores de K_{s1} e mc



Na figura 6 é mostrado o aspecto da tela correspondente à função “Calcular tf” que permite encontrar os parâmetros da equação de Taylor a qual relaciona o tempo de vida da ferramenta com a velocidade de corte, esta função permite a coleta de até quatro amostras, mas possibilita o cálculo com apenas três.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

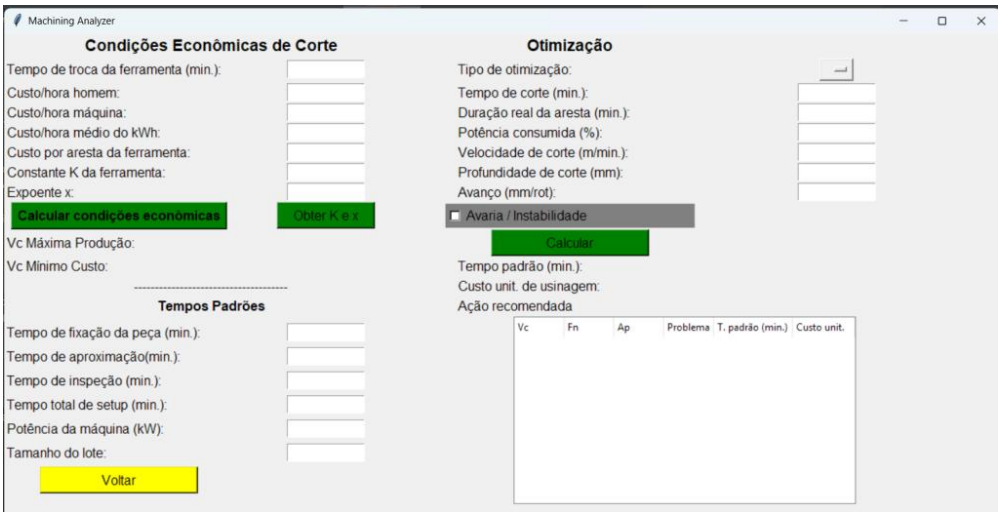
Figura 6. Tela da função “Calcular tf”



A última função disponível é a função de “Otimizar Processo” em que é possível calcular as condições de corte econômicas e fazer a otimização em um processo de torneamento que esteja em execução, calculando o custo da peça em fabricação após a realização de mudanças no processo, possibilitando verificar o resultado dessas alterações de maneira praticamente instantânea.

A figura 7 apresenta uma imagem da tela correspondente a esta função.

Figura 7. Tela da função de otimização de processos



Após a conclusão do aplicativo foram feitos alguns testes a fim de validar os resultados, comparando-os com valores encontrados na literatura, o protocolo dos testes está descrito na seção anterior.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.2. Determinação da pressão específica de corte - Aço ABNT 1045

Durante os testes com o corpo de prova em ABNT 1045 os dados abaixo foram coletados, as informações de % consumida referem-se à potência consumida pelo motor do torno CNC:

Tabela 1. Dados obtidos com o teste com ABNT 1045

Amostra	V_c (m/min.)	a_p (mm)	f (mm/rot.)	% consumida vazio	% consumida usinagem	% consumida considerada	Potência consumida (kW)
1	200	1,5	0,25	6%	23%	17%	3,15
2	200	1,5	0,25	6%	24%	18%	3,33
3	200	1,5	0,15	7%	19%	12%	2,22
4	200	1,5	0,15	9%	21%	12%	2,22

A amostra 2 foi uma repetição da amostra 1 e a amostra 4 uma repetição da amostra 3, desta forma, foram testadas 2 condições de corte diferentes, abaixo é mostrado um resumo:

Tabela 2. Resumo dos dados obtidos com o teste com ABNT 1045

V_c (m/min.)	a_p (mm)	f (mm/rot.)	Potência consumida (kW)
200	1,5	0,25	3,24
200	1,5	0,15	2,22

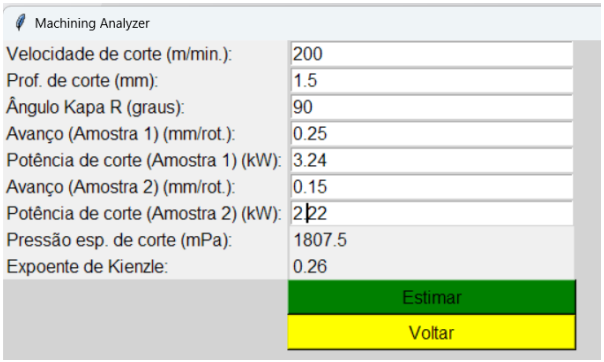
Nota: Foi usada a média entre as potências da amostra 1 e 2, pois houve diferença entre elas.

Estes valores foram então informados ao aplicativo que calculou o valor de K_{s1} e mc como sendo:

K_{s1} = 1807,5

mc = 0,26

Figura 8. Tela do aplicativo com as informações e o resultado - ABNT 1045



Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.3. Determinação da pressão específica de corte - Aço ABNT 4140

Durante os testes com o corpo de prova em ABNT 4140 temperado e revenido os dados abaixo foram coletados, em todos os testes foi usado ângulo de posição de 90 graus:

Tabela 3. Dados obtidos com o teste com ABNT 4140

Amostra	V_c (m/min.)	a_p (mm)	f (mm/rot.)	% consumida vazio	% consumida usinagem	% consumida considerada	Potência consumida (kW)
1	200	1,5	0,25	1%	23%	22%	4,07
2	200	1,5	0,25	1%	23%	22%	4,07
3	200	1,5	0,15	1%	16%	15%	2,78
4	200	1,5	0,15	1%	15%	14%	2,59

A amostra 2 foi uma repetição da amostra 1 e a amostra 4 uma repetição da amostra 3, desta forma, foram testadas 2 condições de corte diferentes, abaixo é mostrado um resumo:

Tabela 4. Resumo dos dados obtidos com o teste com ABNT 4140 temperado e revenido

V_c (m/min.)	a_p (mm)	f (mm/rot.)	Potência consumida(kW)
200	1,5	0,25	4,07
200	1,5	0,15	2,69

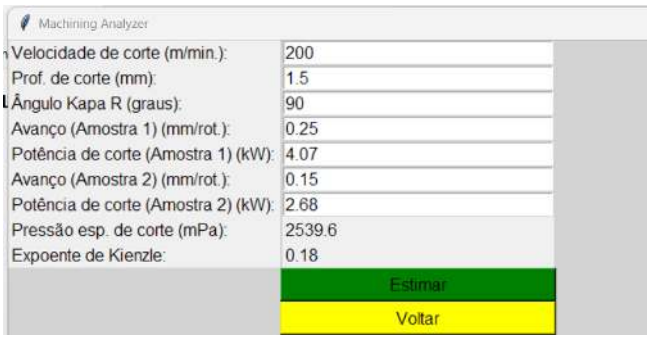
Nota: Foi usada a média entre as potências da amostra 3 e 4, pois houve diferença entre elas.

Estes valores foram então informados ao aplicativo que calculou o valor de K_{s1} e mc como sendo:

K_{s1} = 2539,6

mc = 0,18

Figura 9. Tela do aplicativo com as informações e o resultado - ABNT 4140 temperado e revenido



Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Os valores de K_{s1} e mc calculados pelo aplicativo foram comparados aos valores disponíveis no Compêndio Técnico da marca de ferramentas Walter.

Para o aço ABNT 1045:

Valores obtidos pelo aplicativo: K_{s1} = 1807,5 mPa / mc = 0,26

Valores de referência (Walter, material P2): K_{s1} = 1700 mPa / mc = 0,25

Também foi consultado o material técnico da marca Sandvik, o qual menciona um intervalo de valores para o aço em liga e com teor de carbono acima de 0,25% que vão de 1700 até 1820, com o valor de mc ficando em 0,25.

Para o aço ABNT 4140:

Valores obtidos pelo aplicativo: K_{s1} = 2540 mPa / mc = 0,18

Valores de referência (Walter, material P9): K_{s1} = 2500 mPa / mc = 0,25

Os valores encontrados com a realização dos testes ficaram bastante próximos aos valores de referência, no entanto, vale ressaltar que os testes foram feitos com uma amostra muito pequena de materiais, sendo necessário verificar a consistência dos resultados com maiores quantidades de amostras. Além disso há outros materiais muito comuns na indústria metalúrgica para os quais seria muito importante realizar os testes, como ligas não ferrosas, aços inoxidáveis, ferro fundido etc. As variáveis presentes no processo de usinagem são relativamente sensíveis à influências como o estado da aresta de corte da ferramenta, a robustez da fixação da peça, propriedades físico-químicas do material, variáveis estas que não foram consideradas pelo modelo matemático.

3.4. Determinação dos parâmetros da equação de Taylor para vida da ferramenta

A tabela 5 apresenta um compilado dos parâmetros de corte usados e dos resultados obtidos durante o teste:

Tabela 5. Dados obtidos com o teste de duração da aresta para ABNT 4140 temperado e revenido

Amostra	V_c(m/min.)	a_p (mm)	f (mm/rot.)	Tempo duração (min.)
1	250	1,5	0,25	5,4
2	250	1,5	0,25	5
3	300	1,5	0,25	3,53
4	300	1,5	0,25	3,23
5	350	1,5	0,25	1,5
6	350	1,5	0,25	1,33

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Vale ressaltar que os testes feitos nas amostras 2, 4 e 6 são repetições dos testes feitos com as amostras 1, 3 e 5, para o cômputo dos dados foi calculado o valor médio dos tempos de duração entre os testes 1 e 2, os testes 3 e 4 e os testes 5 e 6 resultando na tabela 6:

Tabela 6. Resumo dos dados obtidos com o teste de duração de aresta com ABNT 4140.

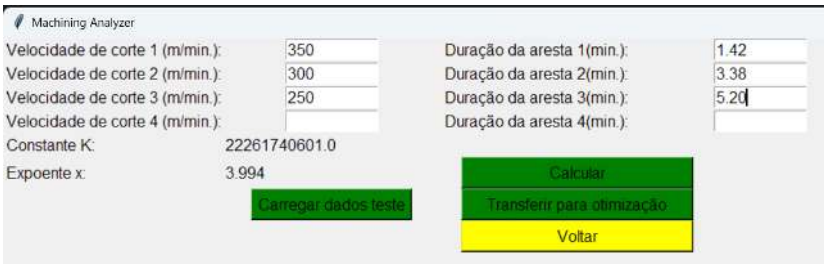
V_c(m/min.)	a_p (mm)	f (mm/rot.)	Tempo duração (min.)
250	1,5	0,25	5,2
300	1,5	0,25	3,38
350	1,5	0,25	1,42

Conforme mostrado na figura 10, os valores dos parâmetros da equação de Taylor foram calculados como sendo:

K = 22.261.740.601

Expoente x: 3.994

Figura 10. Tela do aplicativo com os valores de K e x obtidos no teste com ABNT 4140



Para que se possam validar os resultados obtidos, os valores de K e x encontrados foram introduzidos na equação de Taylor juntamente com as velocidades de corte utilizadas nos testes para que se possa calcular o tempo de duração da ferramenta e então comparar estes valores aos resultados obtidos experimentalmente.

Tabela 7. Comparativo entre os dados calculados e os resultados medidos

V_c (m/min.)	T calculada(minutos)	T encontrada (minutos)	Erro (minutos)	Erro (%)
250	5,89	5,20	0,69	13,3%
300	2,84	3,38	0,54	15,9%
350	1,54	1,42	0,12	8,2%

O erro médio foi de 12,47%, portanto, os resultados apontam que neste exemplo o aplicativo conseguiria estimar a duração da ferramenta de corte com uma precisão média de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

aproximadamente 87,53%. Os resultados podem ser influenciados por outras variáveis as quais não foram consideradas neste estudo, por exemplo, a resistência mecânica do material em usinagem, que pode variar, o que por consequência afetará diretamente o tempo de vida da ferramenta.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora o aplicativo precise de mais testes para validar sua eficácia os resultados obtidos até o momento apresentam boa precisão, indicando que o aplicativo poderá contribuir significativamente para o desenvolvimento e otimização de processos de torneamento. A função de Estudos de processo utiliza fórmulas já consagradas pela literatura técnica pertinente e, portanto, oferece resultados úteis e verossímeis. A função que permite encontrar a pressão específica de corte e o expoente de Kienzle trouxe resultados bastante precisos, apesar destes parâmetros serem influenciados por variáveis que não entraram nos cálculos, como os ângulos da ferramenta e a Velocidade de corte, no entanto, a precisão encontrada parece ser satisfatória. A função de cálculo do tempo de vida da ferramenta apresentou precisão de cerca de 87,53%, algumas alterações no aplicativo podem aumentar essa precisão, como o aumento da quantidade de amostras coletadas, no entanto, essa alteração precisa ser analisada no contexto produtivo, onde se tem pouco tempo para coletar amostras, além de se verificar se o impacto sobre a precisão do resultado justifica a coleta de mais amostras de informações. E por último, a função de otimização de processo traz informações muito importantes que permitirão a rápida tomada de decisões.

O aplicativo carece de testes em um contexto industrial para verificar a viabilidade de seu uso e os resultados gerados em processos reais. A modelagem matemática utilizada apresenta oportunidades de melhoria, como a inclusão de mais variáveis no cálculo da pressão específica de corte, o que contribuirá para resultados mais precisos. Atualmente está em desenvolvimento um algoritmo que utiliza aprendizado por reforço com o intuito de sugerir melhorias no processo, mas esta função ainda carece de verificações e testes. Também é cogitada a ideia de se utilizar o método dos elementos finitos para que se possam prever tensões na peça geradas pela usinagem, além de análises modais que teriam como objetivo antever a ocorrência de vibrações durante o processo. Também se avalia a possibilidade de estender o uso do aplicativo a outras operações de usinagem, como o fresamento e a furação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Anna Carla; SILVEIRA, José Luis. The influence of specific cutting force on end milling models. In: BRAZILIAN CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 16., 2001, Uberlândia. **Proceedings [...]**. Uberlândia: ABCM, 2001. v. 14, p. 486–495.

ARAÚJO, Anna Carla; MOUGO, Adriane Lopes; CAMPOS, Fábio de Oliveira. **Usinagem para engenharia**: um curso de mecânica do corte. Rio de Janeiro: E-Papers, 2020. 360 p.

ARYDES, Felipe Oliveira; FONSECA, Marina Nogueira da; MOUGO, Adriane Lopes. Modelo mecanístico para a pressão específica de corte do aço inoxidável superduplex. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 73., 2018, São Paulo. **ABM Proceedings [...]**. São Paulo: Editora Blucher, 2018. p. 1745–1756.

ASAL, Omer; DILIPAK, Hakan; CANLAR, Berkhan; GULDAS, Abdulmecit. Experimental investigation of the cutting forces in the machining of AISI 4140 steel by using the CNC turning machine. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND NATURAL SCIENCE, 4., 2018, Kiev. **Proceedings [...]**. Kiev: [s. n.], 2018. p. 1-7.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175**: Usinagem - Processos Mecânicos. 2. ed. [S. l.]: ABNT, 2015. 33 p.

COELHO, Reginaldo Teixeira; BRAGHINI JUNIOR, Aldo; VALENTE, Carlos M. O.; MEDALHA, G. C. Experimental evaluation of cutting force parameters applying mechanistic model in orthogonal milling. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 25, n. 3, p. 247-253, 2003.

CROITORU, Cristian. An empirical estimation of cutting force for face milling using a stationary dynamometer. **Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași**: Machine Constructions Section, v. 67, n. 4, p. 53–67, dez. 2021.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2022. 270 p.

ĐURKOVIĆ, Marija; DANON, Gradimir. Comparison of measured and calculated values of cutting forces in oak wood peripheral milling. **Wood Research**, v. 62, n. 2, p. 293-306, 2017.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1970. 751 p.

GOLI, Giacomo; CURTI, Rémi; TODARO, Luigi; MARCON, Bertrand. Specific cutting coefficients for the most common engineered wood products. In: INTERNATIONAL WOOD MACHINING SEMINAR, 25., 2023, Nagoya. **Proceedings [...]**. Nagoya: IWMS, 2023. Disponível em: https://hal.science/hal-04274766. Acesso em: 15 jun. 2026.

JANOTA, Miloslav; KOLAR, Petr; SULITKA, Matej. Operational method for identification of specific cutting force during milling. **MM Science Journal**, v. 2019, n. 4, p. 3250–3257, nov. 2019.

JAYARAM, Sathyadev; KAPOOR, Shiv G.; DEVOR, Richard E. Estimation of the specific cutting pressures for mechanistic cutting force models. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 2, p. 265–281, 2001.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

KARPUSCHEWSKI, B.; SCHMIDT, K.; DRIEHAUS, S.; MEDINA-REYES, S. Determination of specific cutting force components and exponents when applying high feed rates. **Procedia CIRP**, v. 77, p. 30–33, 2018.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015. 403 p.

MALTA, Tulio Francisco Gomes; BACARIN, Rodrigo. **Usinagem em aço SAE 4140**. 2022. 54 f. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade Pitágoras, Divinópolis, 2022.

MUSSOMELI, Adam; MEEKER, Brian; SCHATSKY, David; SHEPLEY, Steve. Expecting digital twins. **Deloitte Insights**, 2 maio 2018. Disponível em: https://www.deloitte.com/us/en/insights/topics/emerging-technologies/understanding-digital-twin-technology.html. Acesso em: 20 jun. 2026.

NIKAM, Bhaskar; KHADTARE, Ajit; PAWADE, Raju. Machinability assessment of AISI 4140 hardened steel using CBN inserts in hard turning. **International Journal of Modern Manufacturing Technologies**, v. 13, n. 1, p. 140-148, jun. 2021.

PEREIRA, Adriano; SIMONETTO, Eugênio de Oliveira. Indústria 4.0: conceitos e perspectivas para o Brasil. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 16, n. 2, p. 1-9, jul. 2018.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **About Python**. 2026. Disponível em: https://www.python.org/about/. Acesso em: 13 maio 2026.

REDDY, M. Madhusudhana; SNG, W. S. Temperature and cutting force analysis in turning of steel AISI 4140 using advanced ceramics tools. **IOP Conference Series**: Materials Science and Engineering, v. 495, e012090, 2019.

SANDVIK COROMANT. **Workpiece materials**. 2026. Disponível em: https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/workpiece-materials. Acesso em: 25 jun. 2026.

SANTANA, Mysael Silva. **Estudo de parâmetros de usinagem do aço SAE 4140 no torneamento CNC**. 2011. 49 f. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011.

SCHLEICH, Benjamin; ANWER, Nabil; MATHIEU, Luc; WARTZACK, Sandro. Shaping the digital twin for design and production engineering. **CIRP Annals**, v. 66, n. 1, p. 141-144, 2017. Disponível em: doi.org. Acesso em: 25 jun. 2026.

SZTANKOVICS, István. Full factorial study on specific cutting forces in tangential turning of 42CrMo4 steel shafts. **Journal of Production Engineering**, v. 28, n. 2, p. 1–9, 2025.

TRENT, Edward M.; WRIGHT, Paul K. **Metal Cutting**. 4. ed. Boston: Butterworth–Heinemann, 2000. 464 p.

WALTER TOOLS. **Technical compendium**: general. Tübingen: Walter Tools, 2025. Disponível em: https://www.walter-tools.com/en-gb/search?k=technical%20compendium. Acesso em: 13 maio 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.