



## ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS POTÊNCIAS DE CORTE REAL E TEÓRICA PARA UM PROCESSO DE TORNEAMENTO

Bruno Nonemacher, [bruno.nonemacher@farroupilha.ifrs.edu.br](mailto:bruno.nonemacher@farroupilha.ifrs.edu.br)<sup>1</sup>  
Giácomo Gai Soares, [giacomo.soares@farroupilha.ifrs.edu.br](mailto:giacomo.soares@farroupilha.ifrs.edu.br)

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS - Campus Farroupilha, Av. São Vicente, 785, CEP:

**Resumo:** A introdução de novas metodologias de projeto, voltadas para a racionalização e otimização do desenvolvimento de máquinas de usinagem surgiram no momento em que decidiu-se estudar os processos de fabricação da maneira mais aprofundada. Em termos de projeto, é de extrema importância conhecer o comportamento das máquinas operatrizes antes mesmo de serem fabricadas, ou seja, fazer uso de conhecimentos teóricos para prever o funcionamento das máquinas no momento em que estiverem em operação no chão de fábrica. O presente trabalho tem como objetivo propor uma comparação entre o equacionamento de potência de corte teórica e potência de corte real para um processo de usinagem por torneamento. Com isto, torna-se possível verificar se a estimativa teórica de potência é suficientemente confiável para ser utilizada durante a realização de projetos para dimensionamento de motores elétricos de máquinas-ferramentas. O primeiro passo dado durante este estudo foi a realização de equacionamentos teóricos que resultaram em um range de potências de corte teóricas (Pct) em função da espessura de corte (h). Para estes cálculos, fez-se o uso de tabelas que apresentam coeficientes relativos a cada tipo de material que usualmente passam por processos de usinagem e que já foram ensaiados anteriormente. Após isto, realizou-se o levantamento de potências de corte reais (Pcr) em função do mesmo parâmetro de usinagem acima citado. Este levantamento efetuou-se em laboratório no decorrer de um processo de torneamento real. Durante este processo, com utilização de um equipamento de medição da intensidade da corrente elétrica (I), aplicou-se a leitura das correntes referidas a cada espessura de corte. Estas correntes, aplicadas à equação da potência, resultaram na gama de potências de corte reais. Com os valores das potências teóricas e reais encontrados, realizou-se a comparação e discussão entre estes valores na forma de tabelas e gráficos que possibilitaram concluir que os cálculos de potência de corte teórica funcionam como uma boa estimativa para obtenção de potência utilizada no dimensionamento de motores elétricos e demais elementos estruturas utilizados em tornos mecânicos. Com isto, evita-se a construção de máquinas superdimensionadas ou a realização de usinagens em que a força de corte atuante seja superior a indicada para determinada ferramenta.

**Palavras-chave:** Potência de corte, Usinagem, Máquinas-ferramentas, Torneamento.

### 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da indústria metal-mecânica está intimamente relacionado à sua capacidade de fabricação eficiente e com qualidade. O torneamento é uma das mais importantes técnicas usadas para fabricação de peças, sendo responsável por uma considerável parcela do total de operações de usinagem realizadas em países industrializados, ou seja, uma alta porcentagem de itens manufaturados têm sido usinados por torneamento em algum estágio de seu processo de produção (LANÇONI, 2008).

Estudos relacionados a melhoramentos neste processo levam a uma maior precisão, produção mais rápida e redução de custos. Fazer o uso da medição das variáveis de processo é uma das maneiras e talvez a mais eficiente de se obter resultados positivos com relação ao custo, produtividade, taxa de remoção do material, entre outros. Existem vários fatores que podem ser mensurados em um processo de torneamento tais como força de corte, vibração e condição da ferramenta. Entre eles, a detecção da força de corte é especialmente importante por uma série de razões, por exemplo: melhor acabamento superficial, exatidão dimensional, vida da ferramenta e melhor utilização da máquina, resultando assim, em maior produtividade (VALLE, 2012).

A importância do monitoramento dos esforços de usinagem é bem reconhecida em toda a comunidade científica. Tanto na indústria como na pesquisa é de grande importância o conhecimento das forças de corte, pois estas são utilizadas para realizar cálculos de potência de usinagem e determinação do consumo de energia da máquina para diferentes parâmetros de corte. Essas forças também encontram aplicação nos cálculos de dimensionamento estrutural dos mecanismos, das ferramentas de usinagem e no levantamento da potência dos motores responsáveis pelo acionamento dos eixos das máquinas-ferramenta (LANÇONI, 2008).

Fazer o uso de conceitos e cálculos teóricos durante o projeto de máquinas e ferramentas também proporcionam menor perda de tempo e menor desperdícios de materiais durante a construção dos projetos, pois assim evita-se que uma mesma peça/elemento seja fabricada inúmeras vezes até que atinja seu perfeito funcionamento (FITZPATRICK M. , 2013).

Há basicamente duas abordagens teóricas aplicadas no estudo dos esforços de corte. A primeira delas parte da fenomenologia de formação do cavaco e, por meio de algumas simplificações dos cálculos. A segunda e mais utilizada, é uma abordagem que pode ser chamada de teoria empírica. Nela os esforços de corte são equacionados utilizando-se coeficientes retirados de procedimentos experimentais (FERRARESI, 1970).

Para a teoria empírica, durante o processo de torneamento, consideram-se a existência de duas potências decorrentes dos movimentos de usinagem, são as chamadas potência de avanço ( $P_f$ ) e de corte ( $P_c$ ). Para efeito de cálculos, a potência de avanço pode ser desprezada por ser cerca de 140 vezes menor que a potência de corte. Para estimativa da potência de corte teórica leva-se em consideração a velocidade de corte e a força de corte atuante no processo decorrente do atrito entre o par peça-ferramenta. A força de corte, por sua vez, é o produto entre a pressão específica de corte ( $K_s$ ) e a área da seção de corte do cavaco ( $A$ ). Essa pressão específica de corte é encontrada em tabelas e depende dos seguintes fatores: material da peça, material e geometria da ferramenta, parâmetros de corte, condições de lubrificação e refrigeração e afiação da ferramenta (DINIZ, MARCONDES, & COPPINI, 2008).

Outra maneira utilizada para avaliação dos esforços de usinagem é a realização de medição das variáveis afetadas em tempo de processo. Em praticamente todas as máquinas-ferramenta de usinagem são empregados motores elétricos de indução para o acionamento de eixos responsáveis pelos movimentos de avanço e corte da ferramenta. Os parâmetros relacionadas aos motores elétricos, como potência e corrente elétrica, são afetados pelo carregamento (forças de usinagem), sistema mecânico e pelo dispositivo eletrônico usado para controlar a velocidade desses motores. Portanto, o conhecimento destas variáveis de processo propiciam a estimativa de potência nominal do motor necessária para realização dos movimentos de usinagem (LANÇONI, 2008).

De acordo com Mannan (1989), a corrente elétrica é a mais sensível a mudanças no processo de usinagem durante a realização de trabalho da ferramenta, ou seja, durante a retirada de material. Devido a isto, a medição da corrente consumida em processo pode ser utilizada para estimar os esforços de usinagem ocorrentes. Outra vantagem do uso da medição dos parâmetros do motor, como corrente e potência, para detectar suas alterações durante o processo de corte é que os instrumentos de medida utilizados não interferem no processo de usinagem.

Levando em consideração o que foi relatado pelo autores citados anteriormente, pode-se concluir que é possível estimar a potência nominal do motor de uma máquina-ferramenta através de cálculos teóricos, entretanto pode-se afirmar que esta estimativa é confiável? A par disto, o presente trabalho tem por objetivo propor uma metodologia de comparação entre consumo de potência real e teórica de um processo de torneamento, ou seja, avaliar a potência real consumida pela máquina operatriz através da utilização de instrumentos de medição eletrônicos e após isso, realizar uma comparação com as potências teóricas calculadas.

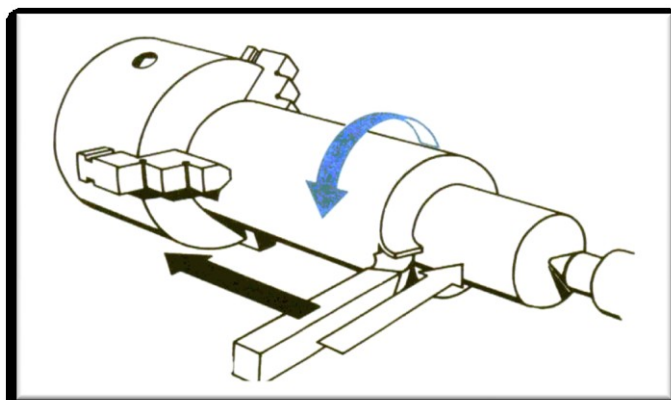
As seções seguintes contêm uma síntese dos principais aspectos relacionados ao consumo de energia em processos de usinagem. Após isso, apresenta-se a metodologia do trabalho, que por sua vez foi dividida em duas partes. A primeira trata-se da estimativa das potências teóricas consumidas por um torno mecânico convencional durante o processo de usinagem. A segunda parte trata-se da aplicação de um sistema para o monitoramento da potência real consumida para o mesmo processo. A apresentação dos resultados obtidos é discutida na quarta seção, a qual é seguida pelas conclusões e referências utilizadas.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. USINAGEM

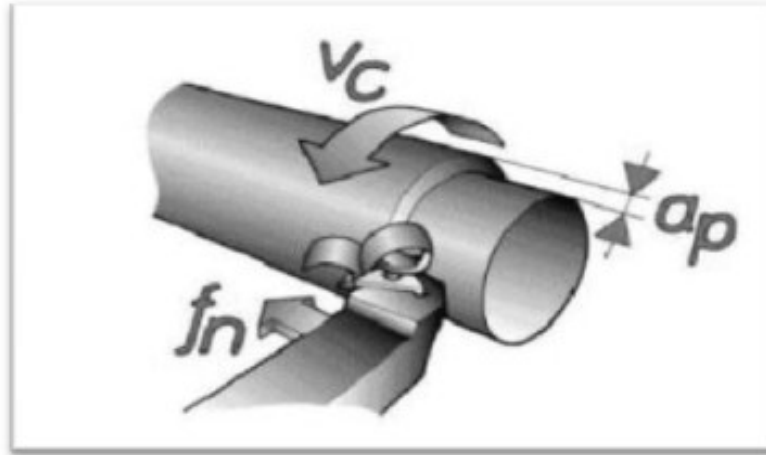
De acordo com Fitzpatrick (2013), a usinagem é o processo de fabricação que confere formato, dimensão e acabamento da superfície de uma peça, removendo-se o material excedente ou sobremetal. Esse sobremetal removido denomina-se cavaco. A remoção deste material ocorre através da interferência entre ferramenta e peça, sendo a ferramenta constituída de um material de dureza e resistência muito superior a do material da peça.

O torneamento é uma das operações de usinagem em que um sólido indefinido é posto a girar ao redor do eixo da máquina operatriz (torno) que executa o trabalho de usinagem ao mesmo tempo que a ferramenta de corte retira material periféricamente, de modo a transformá-lo numa peça definida, tanto em relação à forma quanto as dimensões, como visto na figura 1. As principais operações realizadas em um torneamento são: desbaste, faceamento, sangramento, perfilar e roscar (BORGES, 2009).



**Figura 1:** Processo de torneamento cilíndrico (DINIZ, MARCONDES, & COPPINI, 2008).

Durante a realização de estudos sobre as operações de usinagem, é de extrema importância dar atenção aos parâmetros que são configurados em máquina. Entre todos parâmetros, se destacam a velocidade de corte ( $vc$ ), que é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, o avanço ( $f$ ), que é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça, e a profundidade de corte ( $ap$ ), que caracteriza a espessura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e pela velocidade de corte da ferramenta (AMORIM, 2002). Na figura 2 pode-se observar esses parâmetros.



**Figura 2:** Principais parâmetros de usinagem no processo de torneamento (AMORIM, 2002).

Os parâmetros de usinagem são responsáveis pela realização dos movimentos de usinagem e afetam diretamente os esforços atuantes durante o processo. Eles são facilmente encontrados em tabelas de fabricantes de ferramenta e geralmente dependem do tipo de material da ferramenta ou da peça, da operação de usinagem a ser realizada, do acabamento superficial que se espera na peça e do desgaste da ferramenta (MEDEIROS, 2016).

## 2.2 FORÇAS E POTÊNCIAS DE CORTE EM PROCESSOS DE USINAGEM POR TORNEAMENTO

O estudo do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de usinagem é de fundamental importância, pois eles afetam a potência necessária para o corte (a qual é utilizada para o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta), a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta (FITZPATRICK M., 2013).

Como dito anteriormente, há duas abordagens teóricas comumente utilizadas para cálculos de esforços de usinagem (FERRARESI, 1970). Neste trabalho, a abordagem baseada na teoria empírica será utilizada e somada a ela serão discutidos os aspectos da influência do material na peça, da geometria da ferramenta e das condições de usinagem.

### 2.2.1. Forças atuantes na usinagem

As forças envolvidas no processo de usinagem são reunidas em uma resultante, que é denominada força de usinagem ( $F_u$ ). Apesar disso, não se costuma trabalhar com essa grandeza, mas sim com suas componentes (FERRARESI, 1970).

Ferraresi (1970) subdivide  $F_u$  em duas componentes principais. A primeira, chamada de força ativa ( $F_t$ ), que situa-se no plano de trabalho e, por este motivo, contribui para a potência de usinagem. Já a força passiva ou força de profundidade ( $F_p$ ), é perpendicular ao plano de trabalho e, portanto, não contribui para a potência de usinagem. A equação 1 demonstra a relação que existe entre essas forças.

$$F_u = \sqrt{F_t^2 + F_p^2} \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo:

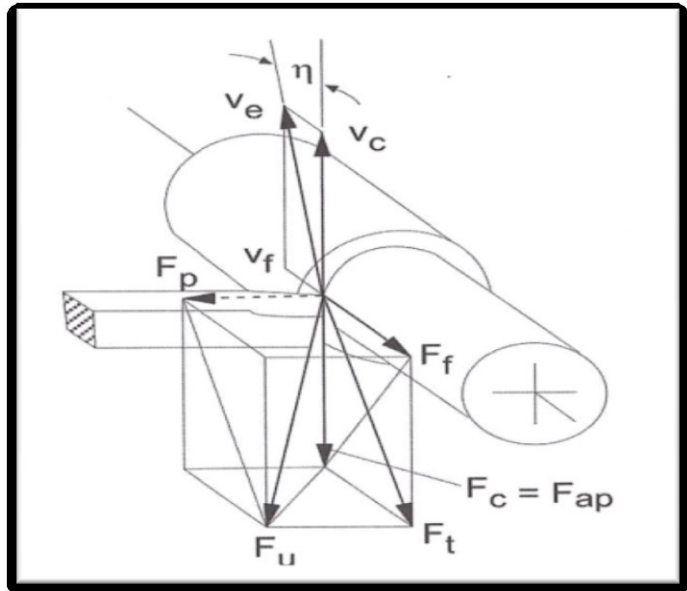
$F_u$  = Força de usinagem [N];

$F_t$  = Força ativa [N];

$F_p$  = Força passiva [N].

A  $F_t$  ainda se subdivide em outras duas componentes (ESPANHOL, 2008). São elas:

- ❖ Força de corte ( $F_c$ ): Projeção da  $F_u$  na direção de corte, dada pela velocidade de corte;
- ❖ Força de avanço ( $F_f$ ): Projeção de  $F_u$  na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço. Na Figura 3, além das componentes já citadas anteriormente, ainda estão representadas:  $F_{ap}$ , que é a projeção de  $F_u$  sobre a direção perpendicular à direção de avanço, situada no plano de trabalho,  $vc$ , que representa o vetor da velocidade de corte,  $vf$ , representando o vetor da velocidade de avanço e  $\beta$ , que é a velocidade efetiva de corte.



**Figura 3:** Componentes das forças atuantes no processo de usinagem por torneamento (FERRARESI, 1970).

Durante uma usinagem, a maior potência é demandada na realização do movimento de corte, o qual geralmente é executado em velocidades muito superiores àquelas necessárias aos movimentos de avanço. Isto implica na presença de um motor de maior potência para execução desse movimento. As maiores variações de potência ocorrem no motor principal, pois as velocidades de avanço são muito pequenas quando comparadas às de corte. Além disso, os motores auxiliares ou as transmissões acopladas ao motor principal possuem demanda constante e significativamente menor, isto é, não variam com as condições de processo. Dessa forma, torna-se razoável avaliar a potência elétrica consumida pelo motor baseando-se apenas na análise da potência de corte e por isso se fez necessário uma expressão teórica que a represente (MACHADO, ABRÃO, COELHO, & SILVA, 2015).

Das várias formulações criadas, a representada na equação 2 é a mais utilizada e relaciona a força de corte com a pressão específica de corte ( $k_s$ ) e a área da seção de corte ( $A$ ) (FERRARESI, 1970).

$$F_c = k_s \cdot A \tag{Eq. 2}$$

Onde:

$F_c$  = Força de corte [N];

$k_s$  = Pressão específica de corte [N/mm<sup>2</sup>];

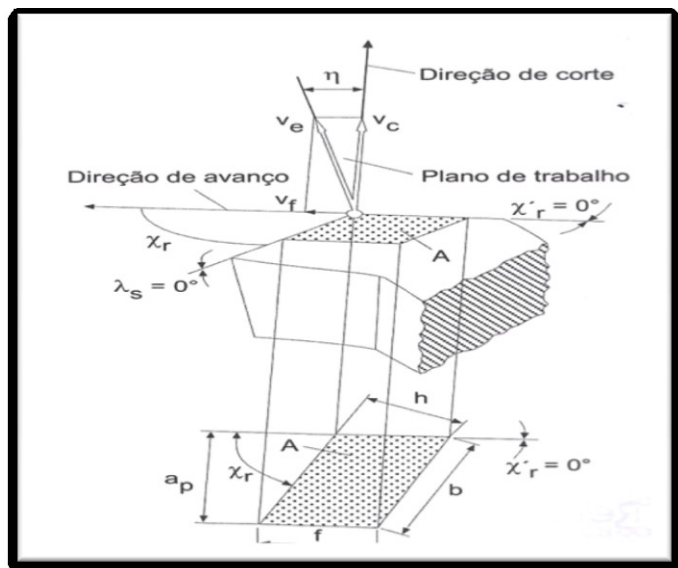
$A$  = Área da seção de corte [mm<sup>2</sup>].

De acordo com Stoeterau (2006), para um processo de torneamento, considera-se a área da seção do corte como:  $A = b \cdot h$ , pode-se observar esta relação na figura 4.

Onde:

$b$  = Largura de corte [mm];

$h$  = Espessura de corte [mm].



**Figura 4:** Representação das grandezas de corte em processo de torneamento (FITZPATRICK M. , 2013).

Aplicando propriedades trigonométricas para encontrar as correlações entre largura de corte ( $b$ ) e espessura de corte ( $h$ ) com os parâmetros de usinagem de profundidade de corte ( $ap$ ) e avanço ( $f$ ) respectivamente, chegou-se as equações 3 e 4 (MACHADO, ABRÃO, COELHO, & SILVA, 2015).

$$b = \frac{ap}{\text{sen } \chi} \quad \text{Eq. 3}$$

$$h = f \cdot \text{sen } \chi \quad \text{Eq. 4}$$

### 2.2.2. Pressão específica de corte

Para Ferraresi (1970), a pressão específica de corte ( $ks$ ) é a pressão que o material desempenha sobre uma determinada área da ferramenta durante o processo de usinagem, variando conforme os fatores envolvidos no processo. Entre eles, se destacam como principais fatores:

- ❖ Material da peça;
- ❖ Material e geometria da ferramenta;
- ❖ Parâmetros de corte ( $f$ ,  $ap$ ,  $vc$ );
- ❖ Condições de lubrificação e refrigeração;
- ❖ Estado de afiação da ferramenta.

#### • Cálculo da pressão específica de corte

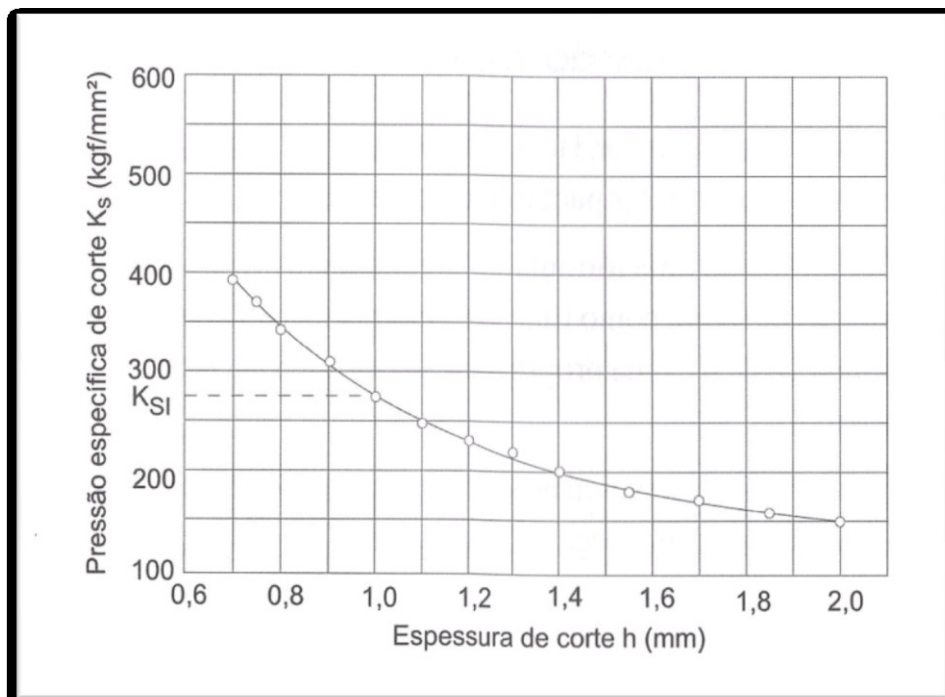
Várias equações para o cálculo de  $Ks$  já foram propostas por autores, como Taylor, Hucks e Kronenberg. Algumas instituições reconhecidas internacionalmente como ASME e AWF também propuseram cálculos satisfatórios (DINIZ, MARCONDES, & COPPINI, 2008).

Kienzle, através da utilização de dados retirados de ensaios reais com determinados pares-ferramentas, apresentou uma equação suficientemente precisa para o cálculo de pressão específica de corte em diversos materiais. Nesta, a aproximação de  $Ks$  representa-se em função da espessura de corte ( $h$ ). Segundo ele, o aumento de  $Ks$  com a diminuição de  $h$  é uma propriedade geral, que vale para todas as operações de usinagem (MACHADO, ABRÃO, COELHO, & SILVA, 2015). Na gráfico 1 pode-se observar a curva característica do ensaio. A equação que descreve esta curva pode ser dada por:

$$Ks = ks1 \cdot h^{-z} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

$ks1$  e  $z$  = constantes do material usinado.



**Gráfico 1:** Gráfico da variação da pressão específica de corte em função da espessura de corte (ESPANHOL, 2008).

Substituindo a equação 5 em 2, tem-se o cálculo da força de corte em função das constantes de determinado material, da espessura e da largura de corte:

$$F_c = K_{s1} \cdot h^{1-z} \cdot b \quad \text{Eq. 6}$$

A tabela 1 apresenta os valores de  $K_{s1}$  e  $1 - z$  de alguns dos materiais ensaiados por Kienzle.

**Tabela 1:** Valores dos parâmetros  $1 - z$  e  $K_{s1}$  para diversos materiais (FERRARESI, 1970).

Material – Aço ABNT	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$1 - z$	$K_{s1}$ (N/mm <sup>2</sup> )
1030	520	0,74	1990
1040	620	0,83	2110
1050	720	0,70	2260
1045	670	0,86	2220
1060	770	0,82	2130
8620	770	0,74	2100

Os valores encontrados nos ensaios valem para um processo de torneamento que respeite as seguintes condições de usinagem:

$V_c = 90$  a  $120$  m/min;

$h = 0,1$  a  $1,4$  mm;

Ferramenta de metal duro sem fluido de corte;

Ferramenta sem desgaste.

Também é importante salientar que a geometria das ferramentas utilizadas nos ensaios apresentavam as seguintes características:

**Tabela 2:** Geometria das ferramentas utilizadas por Kienzle em seus ensaios (FERRARESI, 1970).

Geometria da ferramenta	$\alpha_o$ (°)	$\chi_r$ (°)	$\gamma_o$ (°)	$\lambda_s$ (°)	$\epsilon_r$ (°)	$ap$ (mm)
Usinagem em aço	5	79	6	-4	90	1
Usinagem em fofo	5	83	2	-4	90	1

Onde:

$\alpha_o$ : Ângulo de folga da ferramenta;

$\chi_r$ : Ângulo de posição da ferramenta;

$\gamma_o$ : Ângulo de saída ortogonal da ferramenta;

$\lambda_s$ : Ângulo de inclinação da ferramenta;

$\epsilon_r$ : Ângulo da ponta da ferramenta;

$ap$ : Profundidade ou largura de usinagem.

### 2.2.3. Potência de Usinagem

As potências necessárias ao processo de usinagem resultam dos produtos das componentes de  $F_u$  pelas suas respectivas velocidades. Como as componentes que agem no plano de trabalho são  $F_c$  e  $F_f$ , como já visto na figura 3, têm-se como principais relações as equações 7, 8 e 9 (MACHADO, ABRÃO, COELHO, & SILVA, 2015):

#### ● Potência de corte

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} [\text{W}] \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

$P_c$  = Potência de corte [W];

$F_c$  = Força de corte [N];

$v_c$  = Velocidade de corte [m/min].

De acordo com Diniz et al. (2008), para um processo de torneamento,  $v_c$  é calculada por:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} [\text{m/min}] \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

$d$  = Diâmetro da peça [mm];

$n$  = Rotação da placa do torno [rpm].

- **Potência de avanço**

$$Pf = \frac{Ff \cdot vf}{60 \cdot 10^3} [\text{W}] \quad \text{Eq. 9}$$

Onde:

$Pf$  = Potência de avanço [W];

$Ff$  = Força de avanço [N];

$vf$  = Velocidade de avanço [mm/min].

- **Métodos para medição de potência de usinagem**

Como visto anteriormente, a estimativa de potência de usinagem pode ser realizada com a utilização de tabelas e equações encontradas em bibliografias, porém também é possível encontrar o valor desta potência através da medição do consumo de energia apresentado pelo motor da máquina operatriz durante determinado processo (FITZPATRICK M., 2013).

O torno mecânico universal é um exemplo de máquina que faz uso de apenas um motor trifásico para o movimento de corte e avanço, porém como já dito por Machado et al. (2015), o esforço para a realização do movimento de avanço é muito menor em relação ao de corte e então pode ser desconsiderado, ou seja, praticamente toda a potência excedente consumida pelo motor é proveniente do movimento de corte.

De acordo com Valle (2012), o valor da potência de corte se dá pela diferença entre a potência consumida pela máquina quando ela está operando em vazio, ou seja, sem haver contato entre o par peça-ferramenta e quando há este contato (carregamento). Portanto, pode-se dizer que a potência de corte é o acréscimo de potência consumida quando ocorrem os movimentos de corte e avanço simultaneamente.

Para realizar a medição da potência consumida em motores trifásicos, pode-se fazer uso de um equipamento chamado alicate amperímetro. Este dispositivo é responsável por ler a corrente momentânea ( $I$ ) consumida pelo motor durante o processo. Tendo-se em mãos o valor da corrente medida por determinado instrumento, a potência elétrica é calculada aplicando-se esta corrente à equação que rege o consumo de potência em motores de indução trifásicos, como visto na equação 10 (WEG, 2015).

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi [\text{W}] \quad \text{Eq. 10}$$

Onde:

$P$  = Potência elétrica [W];

$U$  = Tensão da rede [V];

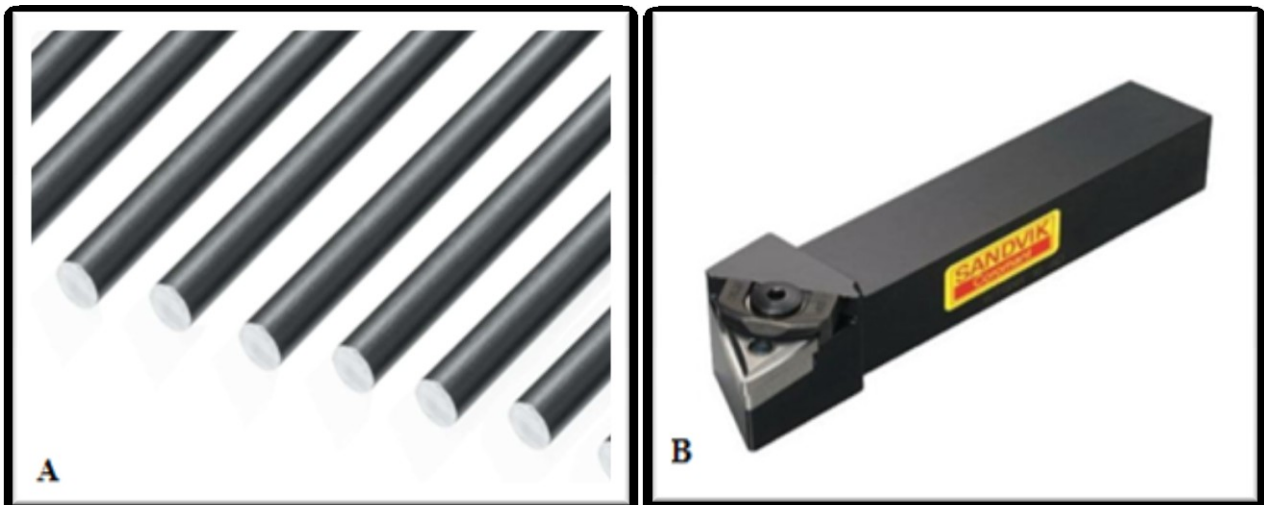
$I$  = Corrente medida [A];

$\cos \varphi$  = Fator de potência (Informado pelo fabricante do motor).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. MATERIAIS

Para a realização dos estudos propostos durante este trabalho acadêmico foram empregados os seguintes materiais: barra redonda de aço ABNT 1045 com diâmetro de 25,4mm (material a ser usinado durante o processo) e ferramenta com inserto de metal duro TNMG, da Sandvik. Na figura 5 pode-se observar os materiais citados.



**Figura 5:** Materiais utilizados: (A) barra redonda de aço 1045 e (B) ferramenta com inserto de metal duro TNMG.

### 3.2. EQUIPAMENTOS

Durante a pesquisa foram utilizados equipamentos como torno mecânico universal, marca Nardini, para realização do processo de usinagem e um alicate amperímetro digital responsável pela medição da corrente consumida durante o processo. A figura 6 apresenta os referidos equipamentos.



**Figura 6:** Equipamentos utilizados: (A) torno mecânico universal e (B) alicate amperímetro digital.

### 3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O experimental deste trabalho dividiu-se em duas etapas. A primeira tratou-se do cálculo da potência de corte teórica ( $P_{ct}$ ) de um processo de usinagem através da utilização de equações provenientes de levantamento literário. Já na segunda etapa efetuou-se o levantamento da potência de corte real ( $P_{cr}$ ) em tempo de processo, ou seja, durante a usinagem em laboratório.

#### 3.3.1. Potência de corte teórica

Durante a realização do cálculo de potência teórica, utilizou-se as constantes retiradas da tabela 1 aplicando-as às equações da força de corte (6) e potência de corte (7). Para a escolha das constantes, considerou-se que o material de estudo se trata de um aço ABNT 1045. Posteriormente, no decorrer do procedimento de usinagem real, utilizou-se o mesmo material.

Como visto na equação 6, a força de corte varia de acordo com as constantes de cada material, da espessura de corte ( $h$ ) e da largura de corte ( $b$ ). Portanto, optou-se para este trabalho avaliar o comportamento da força de corte em função de apenas uma destas variáveis de processo, sendo a espessura de corte a escolhida. Os demais parâmetros mantiveram-se constantes.

De acordo com a relação apresentada pela equação 4, o ângulo de posição da aresta principal de corte da ferramenta ( $\chi$ ) e o avanço ( $f$ ) são os fatores que determinam o valor de  $h$ . Decidiu-se por utilizar, tanto para os cálculos teóricos como para os ensaios reais, um ângulo ( $\chi$ ) de 90 graus. Isso significa que a espessura de corte ( $h$ ) é igual ao avanço ( $f$ ) da máquina operatriz.

A partir deste momento realizou-se o levantamento dos valores dos avanços encontrados na máquina de usinagem, para que estes sejam utilizados durante os cálculos teóricos e posteriormente para os ensaios reais. Lembrando que a faixa de valores a ser utilizada deve respeitar os limites de 0,1 a 1,4 mm/rot, pois as constantes utilizadas foram encontradas durante ensaios que respeitam estes valores. Na tabela 3 estão representados os valores de avanços disponíveis na máquina operatriz (torno) que foi utilizada nos ensaios.

**Tabela 3:** Valores de avanços disponíveis no torno mecânico Nardini.

Avanço ( $f$ ) [mm/rot]	0, 116	0, 150	0, 190	0, 254	0, 348	0, 394	0, 490	0, 620	0, 731	1, 013
-------------------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Outro parâmetro importante a ser escolhido é a largura de corte ( $b$ ). Como visto na equação 3, este depende da profundidade de corte ( $ap$ ) e da mesma maneira que a espessura de corte ( $h$ ), também depende do ângulo de posição da aresta da ferramenta ( $\chi$ ). Já que o ângulo escolhido é igual a 90 graus, o valor de  $b$  se torna igual ao de  $ap$ . Como o valor da profundidade de corte utilizado por Kienzle em seus ensaios foi de 1 mm, o mesmo foi utilizado para os estudos.

Por último e não menos importante, definiu-se o valor da velocidade de corte ( $vc$ ). Para esta decisão, levou-se em conta primeiramente o range utilizado por Kienzle em seus ensaios e após isto, os valores disponíveis na máquina de usinagem. Assim chegou-se no valor de 100 m/min.



Também é importante salientar que a usinagem respeitou as seguintes condições:

- Ferramenta TNMG 160408 com inserto sem desgaste;
- Corpos de prova pré-usinados (retirada de imperfeições superficiais).

### 3.3.3. Medição da potência de corte real

Durante esta prática realizada, a medição de potência de corte real foi realizada de maneira indireta, pois o que foi medido durante os ensaios foi a corrente ( $I$ ) consumida pelo motor. Após isto, a corrente foi aplicada à equação que define o consumo de potência em motores trifásicos (Eq.10).

Para a medição de corrente elétrica do motor de indução trifásico responsável pelo acionamento do eixo árvore do torno, utilizou-se um alicate amperímetro, da marca FLUKE, modelo 376 FC. Com este, mediu-se as correntes consumidas com e sem carregamento de usinagem.

De acordo com a WEG (2015), para ligações trifásicas do tipo triângulo, que é o caso do motor do torno de usinagem utilizado para os experimentos, a corrente que passa em cada uma das fases é igual a corrente total consumida, portanto para medi-la, bastou-se selecionar uma das fases e realizar a leitura da corrente com o instrumento de medição. A figura 8 demonstra o procedimento efetuado.



**Figura 8:** Medição da corrente consumida pelo motor trifásico com alicate amperímetro.

Informações importantes a serem consideradas para o cálculo da potência de corte real:

Tensão ( $U$ ) = 380 V;

Fator de potência ( $\cos \varphi$ ) = 0,9.

Durante o processo de usinagem real, o valor da espessura de corte ( $h$ ) foi alterado dez vezes, da mesma maneira que durante o procedimento teórico, ou seja, para cada um dos valores de  $h$  efetuou-se uma medição da corrente. Com a medição das correntes instantâneas em regime de operação em vazio e com carregamento, pode-se encontrar o acréscimo de corrente proveniente dos esforços de corte. Os resultados destas medições estão expostos na tabela 6.

**Tabela 6:** Valores de correntes ( $I$ ) medidas para cada valor de espessura de corte ( $h$ ).

Espessura de corte ( $h$ ) [mm]	0,116	0,150	0,190	0,254	0,348	0,394	0,490	0,620	0,731	1,013
=Corrente consumida em vazio ( $I$ ) [A]	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
Corrente consumida com carregamento ( $I$ ) [A]	6,7	7,0	7,4	7,9	8,3	8,5	8,9	9,5	10,3	11,3
Acréscimo de corrente ( $I$ ) [A]	0,8	1,1	1,5	2,0	2,4	2,6	3,0	3,6	4,4	5,4

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

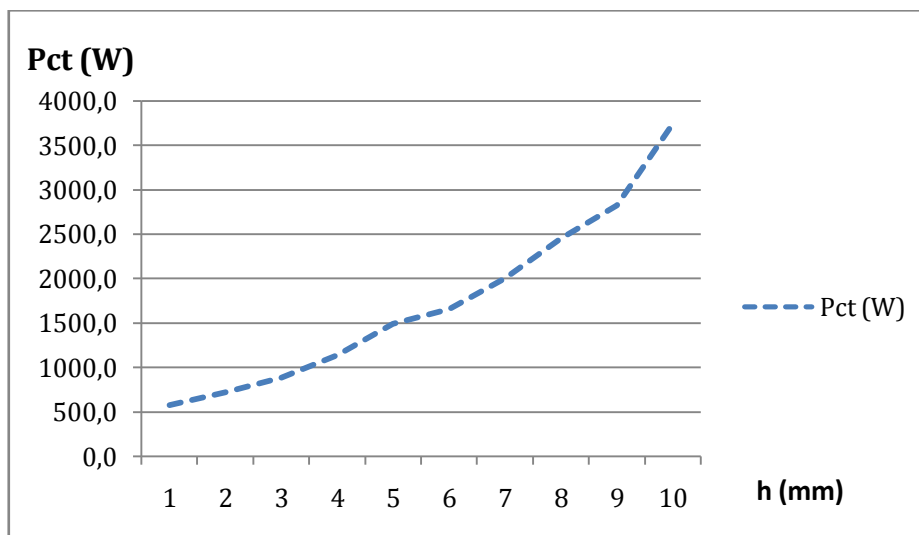
### 4.1. POTÊNCIA DE CORTE TEÓRICA

Através dos equacionamentos teóricos descritos nos tópicos anteriores, foi possível obter os valores de potência de corte teórica ( $P_{ct}$ ). Estes estão apresentados na tabela 7.

**Tabela 7:** Resultados dos cálculos de potências de corte teóricas.

Valores de potência de corte teórica ( $P_{ct}$ ) em função da variação da espessura de corte ( $h$ )										
<b>Espessura de corte (<math>h</math>) [mm]</b>	0,116	0,150	0,190	0,254	0,348	0,394	0,490	0,620	0,731	1,013
<b>Potência de corte teórica (<math>P_{ct}</math>) [W]</b>	580,27	723,8	887,01	1138,5	1492,65	1660,84	2003,4	2452,77	2825,99	3741,32

Traçando a linha da potência de corte teórica ( $P_{ct}$ ) em função da espessura de corte ( $h$ ), visto no gráfico 2, é possível observar que esta potência tende a apresentar um aumento constante em sua intensidade, algo que já era previsto analisado as equações e teorias que conduziram estes resultados.



**Gráfico 2:** Variação da potência de corte teórica em função do aumento da espessura de corte.

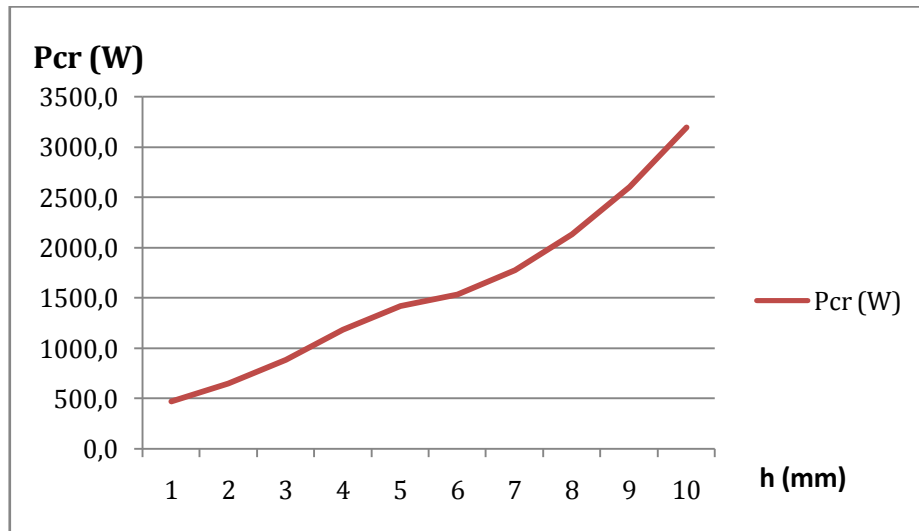
### 4.2. POTÊNCIA DE CORTE REAL

Após encontrado o acréscimo de corrente ( $I$ ) decorrente da usinagem, tornou-se possível calcular a potência de corte real consumida durante o processo de usinagem por torneamento para cada um dos valores de espessura ( $h$ ). Os valores encontrados estão dispostos na tabela 8.

**Tabela 8:** Resultados dos cálculos de potências de corte reais.

Valores de potência de corte reais ( $P_{cr}$ ) em função da variação da espessura de corte ( $h$ )										
<b>Espessura de corte (<math>h</math>) [mm]</b>	0,116	0,150	0,190	0,254	0,348	0,394	0,490	0,620	0,731	1,013
<b>Potência de corte real (<math>P_{cr}</math>) [W]</b>	473,9	651,6	888,5	1184,7	1421,7	1540,1	1777,	2132,5	2606,4	3198,8

Traçando a linha de potência de corte teórica ( $P_{ct}$ ) em função da espessura de corte ( $h$ ), demonstrado no gráfico 3, é possível observar que esta potência aumenta juntamente com o acréscimo da espessura de corte, da mesma maneira do ocorrido com a potência de corte teórica apresentada anteriormente.



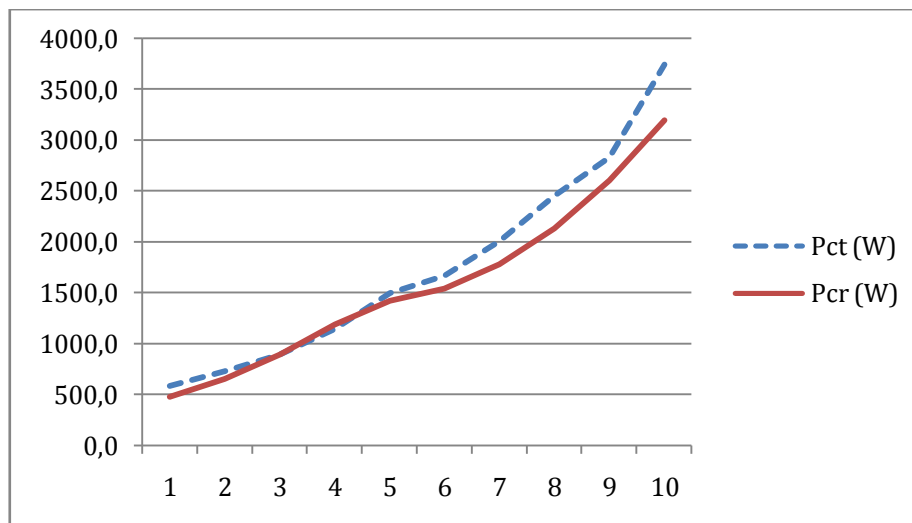
**Gráfico 3:** Variação da potência de corte real em função do aumento da espessura de corte.

Para melhor comparação entre os valores teóricos e reais das potências de corte encontrados, optou-se por apresentá-los juntamente como a variação entre eles na forma de porcentagem. A tabela 9 trás esta apresentação.

**Tabela 9:** Resultados dos cálculos das potências teóricas e reais e variação entre elas.

Valores de potência de corte reais ( <i>Pcr</i> ) em função da variação da espessura de corte ( <i>h</i> )										
Potência de corte teórica (Pct) [W]	580,27	723,8	887,01	1138,5	1492,65	1660,84	2003,4	2452,77	2825,99	3741,32
Potência de corte real (Pcr) [W]	473,9	651,6	888,5	1184,7	1421,7	1540,1	1777,	2132,5	2606,4	3198,8
Variação entre as Potências (%)	-18,33	- 9,98	0,17	4,05	- 4,75	- 7,26	- 11,29	- 13,05	- 7,77	-14, 50

Outra maneira encontrada para facilitar a visualização e análise do comportamento das curvas, foi a sobreposição dos resultados. O gráfico 4 demonstra os valores sobrepostos.



**Gráfico 3:** Sobreposição das potências de corte para cada variação de espessura de corte.

Analisando a sobreposição das linhas resultantes, pode-se concluir que há uma boa relação entre as potências de corte teóricas e reais, ou seja, há um comportamento semelhante entre as potências para os avanços utilizados.

Aparentemente há uma tendência por parte da potência real em se manter logo abaixo da linha teórica, entre  $-4,75\%$  e  $-18,33\%$ , isto pode ser decorrente das condições de usinagem como raio da ponta da ferramenta ou até mesmo das condições dos componentes da máquina de usinagem.

## 5. CONCLUSÃO

Após a realização dos experimentos e comparação entre os resultados obtidos para os cálculos de potências de corte, observou-se que ambas as potências apresentam acréscimo aparentemente linear em sua intensidade no decorrer do aumento da espessura de corte em processo de usinagem. Comparando e sobrepondo os resultados de ambos experimentos, comprovou-se que a potência de corte teórica ( $P_{ct}$ ) apresenta valores satisfatoriamente semelhantes aos valores referidos a potência de corte real ( $P_{cr}$ ) para os mesmo valores de espessura de corte ( $h$ ).

Se tratando de um processo de usinagem por torneamento, comprovar que a utilização de equacionamentos teóricos apresenta resultados confiáveis, significa que durante a realização de um projeto de máquina ferramenta pode-se fazer uso de equações para o levantamento de esforços e potências atuantes em processo. Estes esforços podem ser utilizados para o dimensionamento de motores, ferramentas e demais elementos constituintes.

O conhecimento dos esforços de usinagem, como a força e a potência de corte, impactam também no investimento da produção de máquinas, pois evitam o super ou o subdimensionamento destes equipamentos. Máquinas superdimensionadas geram maiores gastos com manutenção e consomem energia demasiada. Por outro lado, máquinas-ferramentas pouco potentes podem gerar limitações como capacidade de usinagem apenas de peças pequenas, acabamento superficial deficiente e problemas de desgaste e quebra de ferramentas.

Para posteriores estudos, recomenda-se a realização de uma análise estatística que faça avaliação mais aprofundada sobre estes resultados. Pode-se também considerar uma gama maior de espessuras de corte, de geometrias e posicionamentos de ferramentas e assim avaliar se a correlação dos resultados mantém-se constante ao longo do estudo. Outra análise que pode ser realizada dentro desta pesquisa, trata-se da utilização de equipamentos para medição das vibrações atuantes no processo.

## 6. AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida e por colocar em nós força suficiente para vivê-la com coragem, sabedoria e encanto todos os dias.

Aos meus familiares pelo apoio constante, por compreenderem nossos momentos de ausência e vibrarem com nossas vitórias.

A todos os mestres por compartilharem seus saberes, estimulando a busca constante pelo conhecimento, em especial ao professor e orientador. Ms. Giácomo Gai Soares pela paciência na orientação, pelo apoio e incentivo constante durante toda a pesquisa.

E enfim, a todos os colegas que de alguma forma colaboraram para realização do trabalho.

## 7. REFERENCIAS

AMORIM, H. J. (2002). **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste da ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. Porto Alegre: UFRS.

BORGES, J. (2009). *Módulo III: Usinagem Básica*. Fonte: CEFET: [https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/c/cd/Aru\\_j\\_apostila\\_usinagem.pdf](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/c/cd/Aru_j_apostila_usinagem.pdf)

CHIAVERINI, V. (1986). *Tecnologia mecânica*. São Paulo: McGraw-Hill.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., & COPPINI, N. L. (2008). **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber Editora.

ESPANHOL, V. (2008). **Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco**. Porto Alegre: UFRS.

FERRARESI, D. (1970). *Fundamentos da usinagem dos materiais*. São Paulo: Blucher.

FITZPATRICK, M. (2013). *Introdução à manufatura*. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda.

FITZPATRICK, M. (2013). *Introdução aos processos de usinagem*. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda.

LANÇONI, P. (2008). *Estudo comparativo de medição de força de corte no processo de retificação*. Fonte: UNESP - Universidade Estadual Paulista: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90830/lanconi\\_pn\\_me\\_bauru.pdf?sequence=1](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90830/lanconi_pn_me_bauru.pdf?sequence=1)

MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., & SILVA, M. B. (2015). *Teoria da usinagem dos materiais*. São Paulo: Blucher.

MANNAN, A. M. (1989). *Monitoramento e controle adaptativo do processo de corte*. CIRP.

MEDEIROS, G. P. (2016). *Processo de fabricação por usinagem: Parâmetros de corte*. Fonte: IFSC: [https://docente.ifsc.edu.br/gianpaulo.medeiros/MaterialDidatico/Processos%20de%20Fabrica%C3%A7%C3%A3o%20I/Usinagem/Aula%205/Parametros\\_de\\_corte.pdf](https://docente.ifsc.edu.br/gianpaulo.medeiros/MaterialDidatico/Processos%20de%20Fabrica%C3%A7%C3%A3o%20I/Usinagem/Aula%205/Parametros_de_corte.pdf)

SENAI. (1998). *Usinagem - tecnologia de corte*. São Paulo. Fonte: <https://lcsime.files.wordpress.com/2013/01/apostila-senai-processos-mecc3a2nicos-de-usinagem.pdf>

STOETERAU, R. L. (2006). *Fundamentos do processos de usinagem*. Fonte: USP: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS1.pdf>

VALLE, P. (2012). *Análise das potências de corte e rugosidade no processo de usinagem*. Fonte: Universiade Federal do Parana: <https://pt.slideshare.net/StfanoBellote/potncias-de-corte-artigo>

## COMPARATIVE STUDY BETWEEN REAL AND THEORETICAL CUT POTENCES FOR A TURNING PROCESS

Bruno Nonemacher, [bruno.nonemacher@farroupilha.ifrs.edu.br](mailto:bruno.nonemacher@farroupilha.ifrs.edu.br)<sup>1</sup>  
Giácomo Gai Soares, [giacomo.soares@farroupilha.ifrs.edu.br](mailto:giacomo.soares@farroupilha.ifrs.edu.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Sul - IFRS - Campus Farroupilha, Av. São Vicente, 785, CEP:

**Abstrac:** *The introduction of new design methodologies aimed at rationalizing and optimizing the development of machining machines came at a time when it was decided to study the manufacturing processes in the most profound way. In terms of design, it is extremely important to know the behavior of machine tools before they are even manufactured, that is, to make use of theoretical knowledge to predict the operation of the machines when they are in operation on the factory floor. The present work has the purpose of proposing a comparison between the theoretical cutting power and actual cutting power equation for a turning machining process. With this, it is possible to verify if the theoretical power estimation is sufficiently reliable to be used during projects for the design of electric motors of machine tools. The first step taken during this study was the realization of theoretical equations that resulted in a range of theoretical shear powers ( $P_{ct}$ ) as a function of shear ( $h$ ) thickness. For these calculations, tables were used which present coefficients relative to each type of material that usually undergo machining processes and which have already been tested previously. After this, the real cutting power ( $P_{cr}$ ) was surveyed according to the same machining parameter mentioned above. This survey was carried out in the laboratory during a real turning process. During this process, with the use of an equipment of measurement of the intensity of the electric current ( $I$ ), the reading of the chains referred to each cut thickness was applied. These currents, applied to the power equation, resulted in the real cut-off power range. With the values of the theoretical and real powers found, the comparison and discussion between these values were done in the form of tables and graphs that enabled us to conclude that the theoretical cut-off power calculations work as a good estimation to obtain power used in the design of electric motors and other structural elements used in mechanical turning. With this, it is possible to avoid the construction of oversized machines or the realization of machining in which the acting shear force is superior to that indicated for a certain tool.*

**Keywords:** *Cutting power, Machining, Machine-tools, Turning.*