

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**THIAGO AUGUSTO GIRARDI FLORENTINO**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA USINAGEM DE EIXOS FEITOS DE AÇO  
AISI 1045 UTILIZADOS EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2019**

THIAGO AUGUSTO GIRARDI FLORENTINO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA USINAGEM DE EIXOS FEITOS DE  
AÇO AISI 1045 UTILIZADOS EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Freitas de Lima

PATO BRANCO

2019

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### **Análise da eficiência energética na usinagem de eixos feitos de aço AISI 1045 utilizados em pequenas centrais hidrelétricas.**

Thiago Augusto Girardi Florentino

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 29/06/2019 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo-assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. Me. Cícero Gallina de Aguiar  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

---

Prof. Me. Nayane Lais S. Garbin  
(UTFPR – Departamento de Mecânica))

---

Prof. Dr. Fábio Freitas de Lima  
(UTFPR – Departamento de Mecânica)  
Orientador

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

## DEDICATÓRIA

Dedico a todos aos que estão ou foram próximos de mim, pois seus exemplos guiam a bússola de minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a meu orientador, Fábio de Freitas Lima, por toda a ajuda no trabalho, e nas inúmeras outras ocasiões onde nunca se fez ausente apresentando uma sincera busca em fazer o melhor.

Agradeço a todos os professores que me mostraram o caminho até aqui para que assim eu pudesse traçá-lo.

Agradeço a minha família pelo apoio nas piores e melhores horas.

Agradeço a meus amigos, aos que sempre posso contar.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica da UTFPR-PB por ter cedido o laboratório para a realização dos ensaios.

## EPÍGRAFE

*Es gibt keine Tatsachen, nur Interpretationen.*(NIETZSCHE,  
Friedrich(1886))

Não existem fatos, apenas interpretações. (NIETZSCHE,  
Friedrich (1886))

## RESUMO

FLORENTINO, Thiago. Análise da eficiência energética na usinagem de eixos feitos de aço AISI 1045 utilizados em pequenas centrais hidrelétricas. 2019. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Programa de Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco – 2019.

Devido a crescente demanda de energia limpa e renovável no Brasil, uma das opções a serem empregadas são a implementação de pequenas centrais hidrelétricas, onde um dos principais componentes de toda a usina são ambos o eixo do gerador quanto ao eixo da turbina, que são feitos geralmente de aço AISI 1045. Esse trabalho tem como objetivo analisar a usinagem desses eixos, com objetivo de mensurar o consumo de energia elétrica utilizada e desenvolver estratégias de usinagem para aumentar a eficiência do processo.

**Palavras-chave:** Usinagem, Energia Renovável, Eficiência Energética, Pequena Central Hidrelétrica.

## **ABSTRACT**

FLORENTINO, Thiago. Energy efficiency analysis in the machining of AISI 1045 shafts utilized in small hydroelectric centers. 2019.38 p. Completion Coursework(Graduation Program) – Mechanical Engineering Course, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco – 2019.

Because of the crescent demand of clean and renewable energy in Brazil, one of the main options that are being used are the implementation of small hydroelectric centers, where one of the main components used in the whole power plant is both the generator and the turbine shaft, that are usually made from AISI 1045 steel. This paper has the objective of analyze the machining of these shafts, with the objective to measure the electrical energy consumption and to develop machining strategies to improve the efficiency of the process.

**Keywords:** Machining, Turning, Renewable Energy, Efficient Energy, Small Hydroelectric Centers.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Pequena Central Hidrelétrica.....	14
Figura 2: Eixo utilizado em gerador de uma pequena central hidrelétrica.....	15
Figura 3. Operação de Torneamento.....	19
Figura 4. Parâmetros de usinagem.....	21
Figura 5: Torno ROMI TORMAX 20 A.....	27
Figura 6: Alicate Wattímetro Minipa ET-4080.....	28
Figura 7: Esquema de ligação alicate Wattímetro.....	28
Figura 8:Ligação do alicate wattímetro no ensaio.....	29
Figura 9: Suporte MTJN R 2020 K16.....	30
Figura 10: Inseto TNMX 160404 LH.....	31
Figura 11: Inseto TNMG 160408 R.....	32
Figura 12: Inseto TNMG 160404 SY.....	33
Figura 13: Inseto TNMG 160404 MA.....	34
Figura 14: Inseto TNMG 160408 R-ES.....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química do AISI 1045.....	22
Tabela 2. Propriedades mecânicas do AISI 1045.....	22
Tabela 3: Parâmetros de corte utilizados.....	29
Tabela 4: Amostragem do ensaio com a ferramenta TNMX 160404 LH.....	31
Tabela 5: Amostragem do ensaio com a ferramenta TNMG 160408 R.....	32
Tabela 6: Amostragem do ensaio com a ferramenta TNMG 160404 SY.....	33
Tabela 7: Amostragem do ensaio com a ferramenta TNMG 160404 MA.....	34
Tabela 8: Amostragem do ensaio com a ferramenta TNMG 160408 R-ES.....	35
Tabela 9: Resultados amostrais da energia específica de corte.....	36

## LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PCH	Pequena Central Hidrelétrica	
Vc	Velocidade de corte	mm/min
d	Diâmetro da seção da peça	mm
n	Rotações por minuto	Rpm
Vf	Velocidade de avanço	mm/rev
f	Avanço da ferramenta	
Ap	Profundidade de Corte	mm
Q	Taxa de remoção do material	mm <sup>3</sup> /min
SEC	Energia específica de corte	J/mm <sup>3</sup>
HB	Dureza Brinell	
P	Potência consumida no corte	W
AISI	Instituto Americano de Aço e Ferro	

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1. OBJETIVOS.....	16
1.1.1. Objetivo Principal.....	16
1.1.2. Objetivos Específicos.....	16
1.2. JUSTIFICATIVA.....	16
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
2.1. USINAGEM.....	18
2.2. TORNEAMENTO.....	18
2.3. PARÂMETROS DE USINAGEM.....	19
2.3.1. Velocidade de Corte.....	19
2.3.2. Velocidade de avanço.....	20
2.3.3. Profundidade de corte.....	20
2.3.4. Taxa de remoção de material.....	21
2.4. AÇO AISI 1045.....	22
2.5. ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE.....	23
<b>3. METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS).....</b>	<b>24</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>25</b>
4.1. REALIZAÇÃO DE ENSAIO.....	25
4.2. FERRAMENTAS ESCOLHIDAS.....	27
4.2.1. TNMX 160408 LH.....	28
4.2.2. TNMG160408 R-ES.....	29
4.2.3. TNMG 160404 SY.....	30
4.2.4. TNMG 160404 MA.....	31
4.2.5. TNMG 160408 R-ES.....	32
4.3. COMPARATIVO ENTRE ENSAIOS.....	33
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>35</b>

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	35
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>37</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica se faz necessária em todo o espectro das necessidades humanas, sendo a mesma a principal fonte de luz, calor e força no mundo moderno, além de ser diretamente responsável por suprir diversas demandas do bem-estar humano, tais como: saúde, habitação e alimentação.(ELETROBRAS, 2003)

**Figura 1: Pequena Central Hidrelétrica**



**Fonte: Pensamento Verde (2014)**

Devido ao grande aumento da demanda de energia elétrica nos últimos anos, e também a constante busca pela energia renovável, se fazem necessárias fontes alternativas para a obtenção de energia, e no qual se enquadram as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH). Essas unidades geradoras se diferem das hidrelétricas pelo seu tamanho de armazenamento e sua potência de geração. No qual são definidas pequenas centrais hidrelétricas as quais tiverem uma área de reservatório menor que 13 km<sup>2</sup>, excluindo a calha do leito regular do rio, e potência de geração maior que 3.000 kW e menor que 30.000 kW, tendo como diferencial

uma burocracia mais facilitada, dependendo apenas do crivo da ANEEL. (ANEEL,2015)

O principal componente mecânico para a construção de geradores e turbinas para a produção de energia elétrica é o eixo, que servem para transmitir a potência do eixo da turbina para o eixo do gerador assim possibilitando a geração de energia elétrica.(GAUTAM,2010)

**Figura 2: Eixo utilizado em gerador de uma pequena central hidrelétrica**



**Fonte: Autoria Própria (2018)**

Esses eixos são feitos geralmente de aços de médio carbono, no qual são feitos a partir de tarugos laminados ou forjados, dependendo de suas dimensões e disponibilidade do mercado. O principal método de transformação desse produto semiacabado para acabado é o torneamento mecânico, e como sempre o custo é um fator determinante em todos os projetos, este se torna particularmente expressivo na usinagem de peças de dimensões tão elevadas.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Principal

O objetivo desse trabalho é definir a estratégia de torneamento de eixos tanto para geradores quanto para turbinas que serão utilizados em pequenas centrais hidrelétricas, estimando através de alteração de parâmetros a eficiência do processamento, tal qual os custos energéticos envolvidos na operação do torneamento de eixos geralmente utilizados em pequenas centrais hidrelétricas, feitos de aço AISI 1045, de modo a aperfeiçoar o seu processamento e minimizando as perdas com energia elétrica, mantendo a produtividade.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Averiguar o processo de usinagem extrapesada de eixos de geradores e turbinas em empresas que fazem seu processamento.
- Definir as variáveis de corte para o processo.
- Demonstrar como um ensaio pode ser realizado para a obtenção dessas informações de forma prática.
- Estimar o custo energético.
- Determinar ganhos energéticos.
- Definir as ferramentas empregadas.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

Devido ao grande aumento das pequenas centrais hidrelétricas nos últimos anos, que segundo a ANEEL(2018), nos próximos anos mais de 632



pequenas centrais hidrelétricas serão instaladas no Brasil, gerando assim 25.136 MW de capacidade de produção, gerando em torno de 34% da capacidade total brasileira. Com esse fato, se faz notória a necessidade de estudar a fundo o processamento para a instalação das mesmas. O trabalho se justifica devido a falta de literatura sobre o processamento de peças com tais dimensões e o fato de ser extremamente custoso o seu processamento.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. USINAGEM

A usinagem é o termo que descreve diversos processos de manufatura, os quais se referem a retirar pedaços de material excedentes, na forma de cavacos da peça bruta a fim de torná-la finalizada. A usinagem é utilizada em forjados, fundidos e blocos pré formados de material para transformá-los em sua forma acabada, com tamanho, tolerâncias e acabamento desejado. Dessa forma, a usinagem é um dos processos mais importantes no processo de manufatura, e também, um dos mais custosos.(ASM HANDBOOK COMMITTEE, 1989)

Atualmente a usinagem é uma parte significativa na indústria da maioria dos países desenvolvidos, sendo presente em diversos ramos, tais quais se destacam o automobilístico, ferroviário, naval, aeronáutico, eletrônicos e na construção industrial, todos com milhares de empregos envolvidos. Ainda sobre a usinagem, temos que o processo economicamente é responsável por 15% do valor do produto, sendo estimado que por ano apenas nos Estados Unidos, um valor que ultrapassa os 300 bilhões de dólares anualmente.(TRENT; WRIGHT, 2000)

### 2.2. TORNEAMENTO

O torneamento, que é um dos processos de usinagem mais comuns, se caracteriza como o processo de usinagem que gera peças de revolução através de um eixo.(ASM HANDBOOK COMMITTEE, 1989)

O processo combina dois tipos de movimentos, rotação da peça e avanço da ferramenta, sendo que pode ser feito tanto na direção longitudinal da peça, a modo que o seu diâmetro será reduzido, tanto quanto perpendicular a peça, assim indo em direção ao seu centro, faceando-a.(USINAGEM BRASIL,2009)

**Figura 3. Operação de Torneamento**

Fonte – Autoria Própria(2018)

## 2.3. PARÂMETROS DE USINAGEM

Dentre os processos da usinagem, se faz necessário selecionar uma velocidade de corte, uma velocidade de avanço, e uma profundidade do corte. Muitas variáveis se fazem marcantes para a escolha destes parâmetros, que inclui dentre outros fatores o material que se está usinando, a quantidade de material a ser removido, as ferramentas que serão empregadas e a máquina disponível para a operação.(ASM HANDBOOK COMMITTEE, 1989)

### 2.3.1. Velocidade de Corte

A velocidade de corte é segundo Machado(2009) como a “ velocidade do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta segundo a direção e o sentido

do corte”. Para processos com movimento rotativo, como o torneamento por exemplo, a velocidade de corte pode ser definida através da equação (1).

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

$V_c$  = Velocidade de corte [mm/min]

$d$  = Diâmetro da peça [mm]

$n$  = o número de rotações por minuto [rpm]

### 2.3.2. Velocidade de avanço

A velocidade de avanço é definida por MACHADO(2009), como “a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do avanço”. É definida pela equação (2).

$$V_f = f \cdot n \quad (2)$$

Onde:

$V_f$  = Velocidade de avanço [mm/revolução]

$f$  = Avanço [mm/revolução]

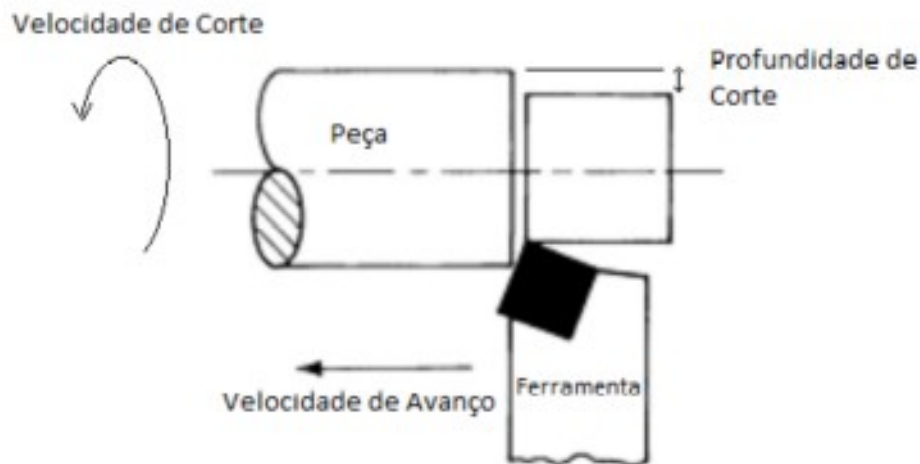
$n$  = número de rotações por minuto [rpm]

### 2.3.3. Profundidade de corte

A profundidade de corte relata a quantia de material que é removido da peça por passada da ferramenta. Geralmente expressa em milímetros ou em polegadas, expressa metade do diâmetro da peça a ser removido e é designada pela sigla  $A_p$ .(CIMM,2010)

Esses três parâmetros independentes são representados na Figura 4.

Figura 4. Parâmetros de usinagem



Adaptado de ASM HANDBOOK COMMITTEE, (1989)

#### 2.3.4. Taxa de remoção de material

A taxa de remoção de material é uma variável de corte dependente, ou seja, depende de outras variáveis, nominalmente a velocidade de corte, a velocidade de avanço e também a profundidade de corte. Ela é importante pois expressa a quantidade de material que está sendo usinado por unidade de tempo, assim demonstrando a produtividade. Pode ser descrita pela equação (3).

$$Q = V_c \cdot V_f \cdot A_p \quad (3)$$

Onde:

$Q$  = Taxa de remoção de material[mm<sup>3</sup>/min]

$V_c$  = Velocidade de corte[mm/min]

$V_f$  = Velocidade de avanço[mm/revolução]

$A_p$  = Profundidade de corte[mm]

## 2.4. AÇO AISI 1045

Devido a suas propriedades mecânicas e sua disponibilidade no mercado nacional, a principal matéria prima para a fabricação de eixos para geradores e bombas utilizadas em pequenas centrais hidrelétricas é o aço AISI 1045.

A composição química do aço AISI 1045 são apresentadas na tabela 1:

**Tabela 1. Composição química do AISI 1045**

Composição química	
Ferro	98.51 – 98.98%
Carbono	0.45%
Silício	0.25%
Manganês	0.75%
Fósforo	<0.050%
Enxofre	<0.050%

Fonte: STEEL INTERNATIONAL, 2012

Já as suas propriedades mecânicas são apresentadas na tabela 2:

**Tabela 2. Propriedades mecânicas do AISI 1045**

Propriedades Mecânicas	
Tensão de Escoamento	300 – 450 MPa
Resistência a Tração	570-700 MPa
Alongamento	14-30 %
Dureza	170-210 HB

Fonte: STEEL INTERNATIONAL, 2012

## 2.5. ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE

Um parâmetro pode ser utilizado para descrever a eficiência energética do processo, pode ser definido pela equação (4):

$$SEC = \frac{P}{Q} \quad (4)$$

Onde:

SEC = Energia Especifica de Corte [J/mm<sup>3</sup>]

P = Potência utilizada pela operação de corte [W]

Q = Taxa de remoção de material[mm<sup>3</sup>/min]

Esse parâmetro pode ser facilmente aplicado para a validação de um novo processo, quando o escopo é o desenvolvimento de um processo com preocupação com sua eficiência energética (ZHAO et al, 2016). Como a usinagem envolve diversos parâmetros diferentes, esse teste pode alterar a potência consumida de maneira não linear, tendo assim resultados dificilmente previsíveis por simulações numéricas ou analíticas.

### 3. METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)

Inicialmente visitas a empresas que fazem o processamento desse tipo de eixos foram realizadas, com o intuito de averiguar quais são as condições que são utilizadas, pois essas informações são cruciais para uma comparação com o trabalho a ser desenvolvido. Os parâmetros avaliados foram as ferramentas utilizadas na produção e parâmetros de cortes empregados.

Após as visitas, com base nos parâmetros iniciais, ensaios serão realizados com amostras de aço AISI 1045 para a medição do consumo de energia elétrica utilizada, e uma média será avaliada a partir dos resultados obtidos.

Para fazer a estimativa do custo energético no torneamento, será analisada de forma indireta, medindo a corrente elétrica demandada e a tensão elétrica, dessa forma, conseguimos medir quanto consumo a operação está exigindo para diversos parâmetros de corte.

Por fim através de uma normalização em relação a taxa de remoção de material será feita uma análise, assim conseguindo nos trazer a estratégia de usinagem mais adequada para esse tipo de operação, que será a com menor custo energético.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. REALIZAÇÃO DE ENSAIO

O ensaio se realizou com um torno convencional modelo ROMI – TORMAX 20 A, o qual pode ser observado na Figura 5. Já o Alicate Wattímetro, que pode ser visto na Figura 6 , que é utilizado para a leitura da potência consumida, foi o Minipa ET- 4080. Sua forma de ligação é representada na Figura 7. Dessa forma

**Figura 5: Torno ROMI TORMAX 20 A**



**Fonte: Aatoria Própria (2019)**

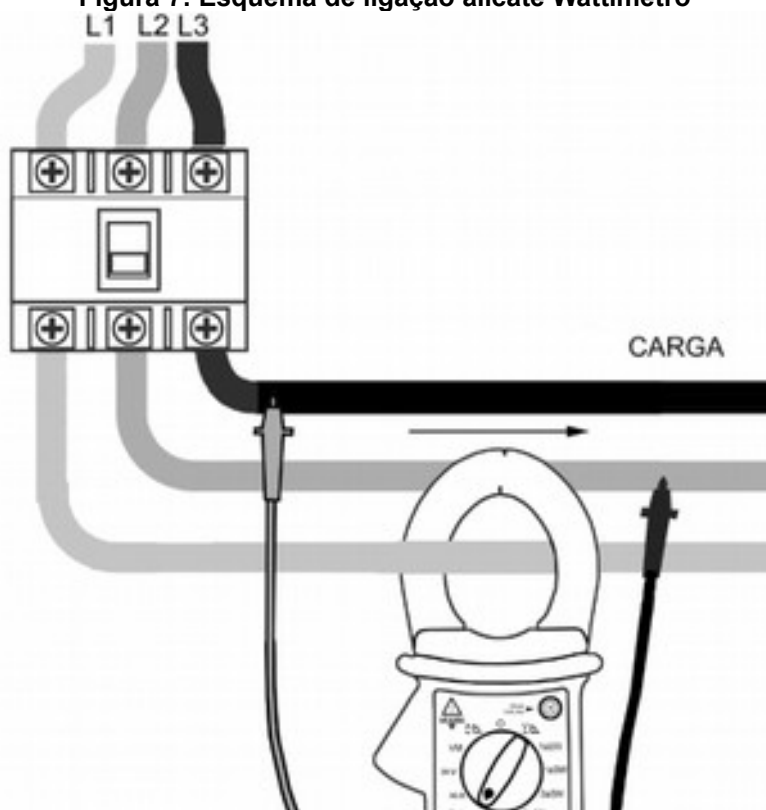
quando conectado nas três fases do torno consegue trazer em tempo real a potência total da máquina consumida durante a operação, assim contemplando as variáveis requisitadas para o ensaio. A forma de ligação na alimentação do torno para a medida da potência pode ser encontrado na Figura 8.

Figura 6: Alicate Wattímetro Minipa ET-4080



Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 7: Esquema de ligação alicate Wattímetro



Fonte: Adaptado de Minipa (2006)

**Figura 8: Ligação do alicate wattímetro no ensaio.**



**Fonte: Autoria Própria (2019)**

O ensaio manteve como parâmetros fixos tanto a velocidade de avanço quanto a velocidade de corte recomendados para a usinagem do aço AISI 1045, conforme a Tabela 3 apresenta:

**Tabela 3: Parâmetros de corte utilizados**

	Velocidade de Corte	Velocidade de Avanço
AISI 1045 (15 a 20 HRC)	120 a 160 m/min	0,187 mm/rev

**Fonte : Adaptado de ASM HANDBOOK COMMITTEE (1989)**

Os parâmetros que foram alterados durante o ensaio foram tanto a profundidade de corte, tal como as ferramentas utilizadas. Foram testadas 5 ferramentas triangulares com geometria similar, porém, com revestimentos e quebra cavacos diferenciados entre si, além de 5 profundidades de corte, que variaram de 0,2 a 1 mm.

#### 4.2. FERRAMENTAS ESCOLHIDAS

O suporte escolhido foi o MTNJ R 2020 K 16, conforme pode ser visto na Figura 9. Esse suporte é utilizado para ferramentas triangulares com tamanho nominal de 16 mm e é um suporte usado para ferramentas de usinagem direita.

**Figura 9: Suporte MTJN R 2020 K16**

**Fonte: Autoria Própria (2018)**

Dessa forma as ferramentas escolhidas foram todas insertos triangulares, devido a estes serem os mais indicados para o desbaste, todas com o tamanho compatível com o suporte, porém com especificações diferentes, tais quais suas coberturas e seus quebra-cavacos. As ferramentas escolhidas foram a TNMX160404 LH da Widia, TNMG160404R-L-ES da Korloy, TNMG 160404 SY da Mistubishi, TNMG 160404 MA e por fim o inserto TNMG 160408 R-ES da Mistubishi. As marcas das ferramentas foram escolhidas tanto pela disponibilidade das mesmas assim como a penetração da marca no mercado nacional, assim podendo ser replicado com facilidade.

#### 4.2.1. TNMX 160408 LH

A TNMX 160404 LH da Widia é um inserto que pode ser visto na Figura 10, a ferramenta consta com revestimento superficial feito com TiAl, e é recomendado para o torneamento de aços carbono ( classe P).

**Figura 10: Inserto TNMX 160404 LH**

**Fonte: Aatoria Própria (2019)**

Sua Performance no ensaio é representada na Tabela 4.

**Tabela 4: Amostragem do ensaio com a ferramenta TNMX 160404 LH**

Amostra	Ap	F(mm/rev)	Vc (m/min)	Potência(W)	Q(mm <sup>3</sup> /min)	SEC(J/mm <sup>3</sup> )
1	0,2	0,187	150,343	720	5,623	128,049
2	0,4	0,187	150,340	940	11,246	83,588
3	0,6	0,187	150,340	1520	16,869	90,109
4	0,8	0,187	150,340	1620	22,491	72,028
5	1	0,187	150,340	1700	28,114	60,468

**Fonte: Aatoria Própria (2019)**

#### 4.2.2. TNMG160408 R-ES

A segunda ferramenta avaliada para o ensaio foi a TNMG 160408 R, da Korloy, que pode ser visto na Figura 11 que é um inserto com revestimento de TiN, e indicado para a usinagem de aços carbono e aços inox (classe P e M).

**Figura 11: Inserto TNMG 160408 R**



**Fonte: Aatoria Própria (2019)**

Sua performance no ensaio pode ser descrita pela Tabela 5.

**Tabela 5: Amostragem do ensaio com a ferramenta TNMG 160408 R**

Amostra	Ap	F(mm/rev)	Vc (m/min)	Potência(W)	Q(mm <sup>3</sup> /min)	SEC(J/mm <sup>3</sup> )
1	0,2	0,187	146,387	800	5,48	146,12
2	0,4	0,187	146,39	1050	10,95	95,89
3	0,6	0,187	147,18	1220	16,51	73,88
4	0,8	0,187	147,97	1840	22,14	83,12
5	1	0,187	150,34	1770	28,14	62,96

**Fonte: Aatoria Própria (2019)**

#### 4.2.3. TNMG 160404 SY

A terceira ferramenta avaliada para o ensaio foi a TNMG 160404 SY da Mistubishi, que pode ser visto na Figura 12, se trata de um inserto com cobertura de TiNAl, e é indicado para a usinagem de aços (classe P).

**Figura 12: Inserto TNMG 160404 SY**



**Fonte: Aatoria Própria (2019)**

A sua performance no ensaio pode ser vista na Tabela 6.

**Tabela 6: Amostragem do ensaio com a ferramenta TNMG 160404 SY**

Amostra	Ap	F(mm/rev)	Vc (m/min)	Potência(W)	Q(mm <sup>3</sup> /min)	SEC(J/mm <sup>3</sup> )
1	0,2	0,187	144,41	990	5,4	183,3
2	0,4	0,187	144,41	1060	10,8	98,13
3	0,6	0,187	144,41	1420	16,2	87,64
4	0,8	0,187	144,41	1400	21,6	64,8
5	1	0,187	144,41	1300	26,63	48,81

**Fonte: Aatoria Própria (2019)**

#### 4.2.4. TNMG 160404 MA

A quarta ferramenta avaliada para o ensaio foi a TNMG 160404 MA da Mistubishi, que pode ser visto na Figura 13, que é um inserto com cobertura de TiN, e indicado para a usinagem de aços carbono, Inox e também ferros fundidos. (classes P, M e K).

**Figura 13: Inserto TNMG 160404 MA**

Fonte: Aatoria Própria (2019)

Sua performance no ensaio pode ser vista na Tabela 7.

**Tabela 7: Amostragem do ensaio com a ferramenta TNMG 160404 MA**

Amostra	Ap	F(mm/rev)	Vc (m/min)	Potência(W)	Q(mm <sup>3</sup> /min)	SEC(J/mm <sup>3</sup> )
1	0,2	0,187	136,5	850	5,11	166,51
2	0,4	0,187	134,51	860	10,06	85,47
3	0,6	0,187	132,54	1070	14,87	71,95
4	0,8	0,187	132,54	1360	19,82	68,59
5	1	0,187	138,47	1450	25,89	56

Fonte: Aatoria Própria (2019)

#### 4.2.5. TNMG 160408 R-ES

A quinta ferramenta avaliada para o ensaio foi a TNMG 160408 R-ES da Mistubishi, que pode ser visto na Figura 14, que é um inserto com revestimento de TiN, e indicado para a usinagem de aços, Inox e também ferros fundidos. (classes P, M e K).



**Figura 14: Inserto TNMG 160408 R-ES**

**Fonte: Aatoria Própria (2019)**

Sua performance pode ser vista na Tabela 8.

**Tabela 8: Amostragem do ensaio com a ferramenta TNMG 160408 R-ES**

Amostra	$A_p$	$F(\text{mm/rev})$	$V_c (\text{m/min})$	Potência(W)	$Q(\text{mm}^3/\text{min})$	$SEC(\text{J}/\text{mm}^3)$
1	0,2	0,187	141,64	800	5,3	151,02
2	0,4	0,187	141,64	920	10,59	86,84
3	0,6	0,187	138,47	1110	15,54	71,44
4	0,8	0,187	141,64	1380	21,19	65,13
5	1	0,187	150,34	1250	28,11	44,46

**Fonte: Aatoria Própria (2019)**

#### 4.3. COMPARATIVO ENTRE ENSAIOS

Analisando os resultados da energia específica consumida em todos os ensaios, conseguimos explicitar os resultados demonstrados na Tabela 9:

**Tabela 9: Resultados amostrais da energia específica de corte.**

Amostras	Ferramenta 1	Ferramenta 2	Ferramenta 3	Ferramenta 4	Ferramenta 5
1	128,05	146,12	183,3	166,5	151,02
2	83,59	95,89	98,13	85,47	86,84
3	90,11	73,88	87,64	71,95	71,44
4	72,03	83,12	64,8	68,59	65,13
5	60,47	62,96	48,81	56,16	44,46

**Fonte: Autoria Própria**

Conforme os resultados apresentados demonstram, fica evidente que tanto as ferramentas 3 e 5 apresentam as melhores condições energéticas na operação de torneamento, assim, sendo as melhores candidatas para a operação quando operadas com a profundidade de corte de 1 mm. Já em contra partida, a ferramenta 2, com 0,8 mm de profundidade de corte, teria uma das piores condições do ensaio, consumindo em torno de 86,9% a mais de energia elétrica para cada mm<sup>3</sup> de material retirado da peça, quando comparada com a ferramenta 5, na condição mais eficiente. Dessa forma fica evidente que pequenas alterações podem trazer diferenças grandes na sua eficiência energética, e por consequência, no custo total do processamento da peça acabada, fazendo assim, uma diferença gigantesca no custo final de produção da peça, e por consequência, a competitividade da indústria que faz seu processamento.

## 5. CONCLUSÕES

Conforme o escopo inicialmente estruturado para a execução deste trabalho, que envolve o estudo do torneamento de aços AISI 1045 para a obtenção de eixos utilizados em pequenas centrais hidrelétricas, além de buscar estratégias de corte para trazer uma eficiência energética maior em relação ao processo, tal qual definir um parâmetro para análise do mesmo, pode se concluir que os objetivos do trabalho foram atingidos.

O trabalho começou devido a uma demanda de literaturas específicas sobre o assunto de usinagem extrapesada, e também, por necessidade da indústria local, onde algumas empresas faziam o processamento de peças para essa aplicação, porém a usinagem era adotada de uma forma empírica.

Os ensaios experimentais seguiram a metodologia especificada, sendo assim definida e baseada na literatura e especificações técnicas, com objetivo de se obter resultados confiáveis e replicáveis, assim garantindo a repetibilidade do processo. O ensaio se realizou em 5 séries de testes, resultando em 25 amostras, as quais foram medidas seu gasto energético em frente a sua taxa de remoção de material.

Mais que a avaliação dos resultados do ensaio, a própria metodologia de ensaio, que foi realizado de forma simples e não requer um gasto de recursos e tempo exacerbado se mostra uma ferramenta valida para a seleção de ferramentas para fim de tornear peças com tamanha dimensão.

Por fim, foi verificado que a diferença de consumo energético entre duas estratégias similares, podem alterar em quase 90% do consumo total despendido para a operação.

Dentre as dificuldades encontradas no trabalho, se destacam a dificuldade de testar em tornos com capacidade de corte similares as utilizadas no desgaste pesado, assim como o acesso limitado a ferramentas e suportes com geometrias diferentes.

### 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Adição de outras geometrias e coberturas de ferramentas

- Maior variação da profundidade de corte
- Implementação do parâmetro tempo de usinagem

## REFERÊNCIAS

ANEEL. *AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA-ANEEL RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 673, DE 4 DE AGOSTO DE 2015 (\*)*. . [S.l: s.n.], [S.d.]. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015673.pdf>>. Acesso em: 28 set. 2018.

ANEEL. *DADOS RELATIVOS AOS LEILÕES A-4 E A-6 (2017) (25º E 26º LEN)*. . [S.l: s.n.], 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/655816/14483518/Relatório+de+Acompanhamento+da+Implantação+de+Empreendimentos+de+Geração+N11+Março+2018/c74e72f2-cc88-3ea6-5608-d596a4a33154?version=1.0>>. Acesso em: 20 maio 2019.

ASM INTERNATIONAL. *Machining*. [S. l.: s. n.], 1989.

CIMM. *Variáveis e Parâmetros de Corte | Usinagem - CIMM*. Disponível em: <[https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/4861-variaveis-e-parametros-de-corte#.W7T9dGhKiUk](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/4861-variaveis-e-parametros-de-corte#.W7T9dGhKiUk)>. Acesso em: 3 out. 2018.

ELETROBRAS. *Importância da energia elétrica*. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/natrilhadaenergia/main.asp?View=%7BB1E5C97A-39C6-49BE-9B34-9BC51ECC124F%7D>>. Acesso em: 28 set. 2018.

GAUTAM, Anupam. *Structural analysis of Kaplan turbine shaft using ansys*. [S.d.], [S.l: s.n.], [S.d.]. Disponível em: <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990490/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2018.

MACHADO, Álisson Rocha *et al.* *Teoria da Usinagem dos Materiais*. São Paulo-SP: Blucher, 2009.

MINIPA. *Alicate Wattímetro Digital - ET 4080 - Manual de Instruções*. [S. l.: s. n.], 2006. Disponível em: <http://www.minipa.com.br/images/Manual/ET-4080-1100-BR.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2019.

PENSAMENTO VERDE. *Entenda como funciona uma Pequena Central Hidrelétrica*. [S. l.], 20 nov. 2014. Disponível em: <https://www.pensamentoverde.com.br/sustentabilidade/entenda-como-funciona-uma-pequena-central-hidreletrica-pch/>. Acesso em: 6 fev. 2019.

TRENT, Edward M.; WRIGHT, Paul K. *Metal Cutting*. [S.l: s.n.], 2000.

USINAGEM BRASIL. *O que é torneamento? (\*) - Usinagem Brasil*. Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/44-o-que-e-torneamento/>>. Acesso em: 2 out. 2018.

ZHAO, Guoyong *et al.* Energy consumption characteristics evaluation method in turning. *Advances in Mechanical Engineering*, v. 8, n. 11, p. 168781401668073, 21 nov. 2016. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1687814016680737>>. Acesso em: 22 nov. 2018.