

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**LIOVANI BEATRIZ BREMM**

**ESTUDO DO EFEITO DA TEMPERATURA NA RUGOSIDADE E POTÊNCIA DE  
CORTE NO PROCESSO DE TORNEAMENTO A QUENTE**

**Alegrete**

**2017**

**LIOVANI BEATRIZ BREMM**

**ESTUDO DO EFEITO DA TEMPERATURA NA RUGOSIDADE E POTÊNCIA DE  
CORTE NO PROCESSO DE TORNEAMENTO A QUENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Me. Aldoni Gabriel Wiedenhöft

Coorientador: Eng. Mec. Carlos A. G. Aita

**Alegrete**

**2017**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo (a) autor (a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

B836e Bremm, Liovani Beatriz  
ESTUDO DO EFEITO DA TEMPERATURA NA RUGOSIDADE E  
POTÊNCIA DE CORTE NO PROCESSO DE TORNEAMENTO A  
QUENTE / Liovani Beatriz Bremm.  
73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2017.  
"Orientação: Aldoni Gabriel Wiedenhof".

1. Torneamento a quente. 2. Rugosidade. 3. Potência de corte. I.  
Título.

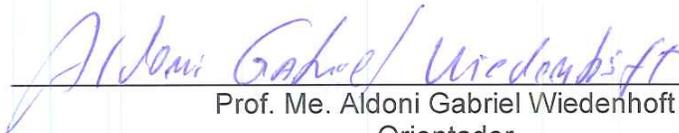
LIOVANI BEATRIZ BREMM

**ESTUDO DO EFEITO DA TEMPERATURA NA RUGOSIDADE E POTÊNCIA DE  
CORTE NO PROCESSO DE TORNEAMENTO A QUENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal do  
Pampa, como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 28 de Junho de 2017.

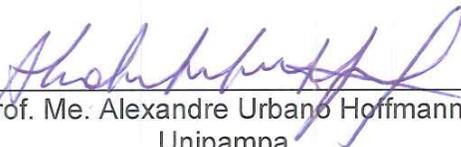
Banca examinadora:



Prof. Me. Aldoni Gabriel Wiedenhoft  
Orientador  
Unipampa



Prof. Dr. Ana Claudia Costa de Oliveira  
Unipampa



Prof. Me. Alexandre Urbano Hoffmann  
Unipampa

Dedico este trabalho a minha família, que esteve presente durante toda a trajetória de minha vida, me incentivando e dando apoio para vencer os obstáculos.

## **AGRADECIMENTO**

Dedico os meus agradecimentos primeiramente aos meus pais, Gervásio e Rita, irmãs Liete e Lioni, aos meus cunhados Inácio e Wilson, meus sobrinhos, Mikaella, Marjorie, Lucas e Arthur, por sempre acreditarem em mim, até quando eu mesma não o fazia.

Venho agradecer ao orientador Prof. Me. Aldoni Gabriel Wiedenhof e também ao coorientador Engenheiro Mecânico Carlos Aita pelo apoio, pela ajuda e pela disponibilização do seu tempo.

Aos meus amigos pelo companheirismo, pela amizade, pela compreensão e apoio principalmente nos momentos difíceis de minha vida.

Agradeço aos técnicos de laboratório Ivan e Milene por estarem sempre dispostos a ajudar os alunos.

Agradeço a Deus pelas suas bênçãos e luz em todo o meu caminho percorrido.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

## RESUMO

A usinagem é classificada como um processo de fabricação em que ocorre a retirada de material, conferindo formas e acabamento à peça usinada. A indústria metal mecânica vem evoluindo ao longo dos anos com a criação da máquina ferramenta, a qual facilita a retirada de material, conhecido como cavaco. No processo de torneamento, são encontradas diversas dificuldades relacionadas a dureza do material que podem causar defeitos em sua superfície devido às tensões residuais, trincas, rugosidade da superfície excessiva e até perdas nas propriedades fundamentais do metal. No intuito de melhorar os problemas encontrados, foi realizado o torneamento a quente com fontes externas de calor, na qual a peça foi aquecida em um forno elétrico e posteriormente mantida sua temperatura com resistências elétricas infravermelho em cerâmica, com o objetivo de melhorar sua usinabilidade. Esse procedimento melhorou a retirada de cavaco, bem como a redução do consumo específico de potência utilizada pelo torno para a realização do processo, ocupando pouco espaço e sendo considerado baixo seu custo de aquisição. A diminuição do consumo de potência apresentou seus melhores desempenhos na temperatura de 200°C, assim como os valores obtidos para rugosidade superficial e a geração de cavaco.

Palavras-chave: torneamento a quente, usinabilidade, resistências infravermelho em cerâmica, rugosidade, forças e potências de trabalho.

## **ABSTRACT**

Machining is classified as a manufacturing process in which material removal occurs, giving shape and finish to the machined part. The metallurgical industry has been evolving over the years with the creation of the machine tool, which facilitates the removal of material, known as agglomerate. In the turning process, various difficulties are encountered related to the hardness of the material which can cause surface defects due to residual stresses, cracks, excessive surface roughness and losses in the fundamental properties of the metal. In order to improve the problems encountered, the hot spin was performed with external heat sources in which the part was heated in an electric oven and subsequently maintained its temperature with electrical infrared electrical resistors to improve its machinability. This procedure improved chip removal as well as reducing the specific power consumption used by the winch to carry out the process, taking up little space and being considered under its cost of acquisition. The reduction of the energy consumption presented the best performances at the temperature of 200 ° C, as well as the values obtained for surface roughness and chip generation.

Keywords: hot turning, machinability, infrared ceramic resistance, roughness, strength and working powers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais operações executadas no torno. ....	19
Figura 2 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no torneamento. ....	21
Figura 3 - Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma ferramenta de torneamento. ....	25
Figura 4 - Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo. ....	26
Figura 5 - Classificação dos processos de fabricação. ....	27
Figura 6 - Classificação da integridade superficial. ....	29
Figura 7 - Representação de diferentes superfícies com o mesmo valor de Ra. ....	29
Figura 8 - Efeito do encruamento (por trefilação a frio) na vida da ferramenta. ....	31
Figura 9 - Usinabilidade dos diversos tipos de ferros fundidos. ....	32
Figura 10 - Variação da distribuição da energia de corte com a velocidade. ....	33
Figura 11 - Regiões onde o calor é percebido durante a formação de cavacos. ....	35
Figura 12 - Representação esquemática do experimento. ....	36
Figura 13 - Potência elétrica no torneamento a quente e convencional para diferentes profundidades de corte. ....	37
Figura 14 - Organograma de atividades. ....	38
Figura 15 - Emissor Infravermelho em Cerâmica 2GQ. ....	40
Figura 16 - Emissor Infravermelho em Cerâmica 1FPC. ....	42
Figura 17 - Suporte de fixação das resistências. ....	43
Figura 18 – Modelo construído para experimentos. ....	43
Figura 19 - Amostra e equipamento de medição, paquímetro. ....	44
Figura 20 – (a) Cortadora metalográfica e em (b) vista interna dos componentes. ....	45
Figura 21 – (a) Dados técnicos do torno e (b) Torno Mecânico. ....	46
Figura 22 – (a) Forno elétrico e (b) Interface no computador. ....	46
Figura 23 – Medidor de potência do experimento. ....	47
Figura 24 – Medidor de temperatura. ....	48
Figura 25 - Rugosímetro digital. ....	48
Figura 26 – (a) Nivelamento da mesa de medição e (b) Nivelamento do equipamento. ....	49
Figura 27 – (a) Adaptação dos suportes para prender o rugosímetro e (b) Realização das medições. ....	50
Figura 28 – Valores orientativos das pressões específicas de corte (AWF-158). ....	54

Figura 29 – Superfície de resposta da potência consumida.....	58
Figura 30 – Superfície de resposta da rugosidade superficial.....	61
Figura 31 – (a) Temperatura ambiente e (b) na temperatura de 200°C. ....	62
Figura 32 – (a) Cavacos gerados com a peça a uma temperatura de 400°C e (b) para uma temperatura de 600°C. ....	63
Figura 33 – (a) Geração de cavacos a temperatura ambiente e (b) a temperatura de 200°C. ....	64
Figura 34 – (a) Geração de cavacos a temperatura de 400°C e (b) a temperatura de 600°C. ....	64
Figura 35 – Resistência infravermelho em cerâmica plana. ....	72
Figura 36 – Resistência infravermelho em cerâmica côncava. ....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Elementos de liga e suas influências na usinabilidade do alumínio. ....	32
Tabela 2 - Atividades a serem realizadas. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 3 - Dados técnicos referente a resistência plana utilizada no processo. ....	41
Tabela 4 - Relação de temperatura x potência apresentada pela resistência plana. ....	41
Tabela 5 - Dados técnicos referente a resistência côncava utilizada no processo. ....	42
Tabela 6 - Dados técnicos das amostras torneadas. ....	44
Tabela 7 – Combinações das amostras. ....	51
Tabela 8 - Dados referentes ao avanço de 0.05 mm/volta e 0.2 mm/volta relacionado a variação de temperatura.....	56
Tabela 9 – ANOVA para potência nos avanços de 0,2 mm/volta e 0.05 mm/volta. ...	57
Tabela 10 - Dados referentes a rugosidade média relacionada com a variação de temperatura e ao avanço de corte de 0.05 e 0.2 mm/volta. ....	59
Tabela 11 – ANOVA para rugosidade superficial nos avanços de 0,2 mm/volta e 0.05 mm/volta.....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- Ve - Velocidade efetiva (m/min)
- Vc - Velocidade de corte (m/min)
- Vf - Velocidade de avanço (mm/min)
- n - Rotação por minuto (RPM)
- d - diâmetro (m)
- Fc - Força de corte (N)
- Ff - Força de avanço (N)
- Fp - Força passiva ou de profundidade (N)
- Pf - Potência de avanço (kW)
- Pc - Potência de corte (kW)
- Pi - Potência instantânea (W)
- V(t) - Voltagem em relação ao tempo (V)
- I(t) - Corrente elétrica em relação ao tempo (A)
- W - Watt (J/s)
- Ks - Pressão específica de corte (N/mm<sup>2</sup>)
- A - Área da seção de corte (mm<sup>2</sup>)
- ap - Profundidade de corte (mm)
- f - velocidade de avanço (mm/volta)
- Pm - Potência fornecida pelo motor (W)
- $\eta$  - Rendimento máquina operatriz
- CN - Controle Numérico
- re - Raio de ponta (mm)
- Ra - Média aritmética dos valores do perfil
- Rt - Soma da maior altura de pico com a maior profundidade de vale
- $\theta_e$  - Ângulo de entrada
- $\theta_s$  - Ângulo de saída
- HB - Dureza Brinell
- LAM - Laser Additive Manufacturing

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1 Definição do Problema</b> .....	16
<b>1.2 Objetivos</b> .....	17
<b>1.2.1 Objetivo Geral</b> .....	17
<b>1.2.2 Objetivos Específicos</b> .....	17
<b>1.3 Justificativa</b> .....	17
<b>1.4 Estrutura do Trabalho</b> .....	18
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
<b>2.1 Potências e forças de corte necessárias na usinagem</b> .....	20
<b>2.2 Remoção de material e formação de cavaco no processo</b> .....	24
<b>2.3 Rugosidade superficial</b> .....	28
<b>2.4 Usinabilidade dos materiais</b> .....	30
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	38
<b>3.1 Cronograma</b> .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>4 DESENVOLVIMENTO</b> .....	40
<b>4.1 Suporte das Resistências Infravermelho em Cerâmica</b> .....	40
<b>4.2 Material e Equipamento Utilizado</b> .....	44
<b>4.2.1 Material das Amostras</b> .....	44
<b>4.2.2 Cortadora Metalográfica</b> .....	45
<b>4.2.3 Torno Mecânico</b> .....	45

4.2.4 Forno de Aquecimento Elétrico .....	46
4.2.5 Medidor de Potência .....	47
4.2.6 Medidor de Temperatura .....	47
4.2.7 Rugosímetro .....	48
4.3 Procedimento e Parâmetros Adotados no Experimento .....	50
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>53</b>
5.1 Consumo de Potência .....	53
Consumo Potência Avanço de 0.05 mm/volta e 0.2 mm/volta .....	56
5.2 Rugosidade Superficial .....	59
Rugosidade Superficial para Avanço de 0.05 mm/volta e 0.2 mm/volta.....	59
5.3 Geração de Cavaco.....	62
Cavacos com avanço de 0.2 mm/volta .....	62
Cavacos com avanço de 0.05 mm/volta .....	64
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>66</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>68</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>72</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Definição do Problema

Com a revolução industrial o metal foi se tornando cada vez mais essencial em nosso cotidiano, na qual novas técnicas e ferramentas foram criadas. A criação de máquinas ferramenta, também responsável pela produção de outras ferramentas ou máquinas, impulsionou o desenvolvimento da indústria metal mecânica.

Até meados do século XVIII, o principal material utilizado para peças, em engenharia, era a madeira, salvo raras exceções, a qual era usinada com ferramentas de aço carbono. (MACHADO et al., 2011, p. 15)

Conforme Ferraresi (1970) pode-se compreender como operações de usinagem, os processos que produzam cavaco, gerando novas formas, acabamentos ou dimensões às peças.

O processo de usinagem tem por objetivo fazer transformações em metais e ligas, podendo também ser aplicado a produtos plásticos. As máquinas operatrizes, tais como o torno mecânico, as retificadoras, as fresadoras, entre outras; foram utilizadas para a produção em larga escala, propiciando o desenvolvimento e uma redução significativa dos custos envolvidos no processo. (TRENT e WRIGHT, 2000)

A usinagem emprega milhões de pessoas e tem como um dos seus grandes desafios a redução do custo decorrente de seus processos na fabricação. Segundo Amorim (2002) a usinagem possui desvantagens se comparada a outros processos de fabricação, como exemplo a baixa velocidade de produção.

Devido aos desenvolvimentos de aços de elevada dureza e resistência mecânica, existe uma grande dificuldade em usiná-lo, limitando de forma significativa a vida da ferramenta de corte empregada no processo. A vida da ferramenta de corte é o tempo que ela trabalha efetivamente, até perder sua capacidade e necessitar ser substituída ou reafiada. (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010)

A remoção de material exige da máquina ferramenta grandes forças de usinagem e elevada potência, podendo até inviabilizar o processo. Segundo Nascimento e Abrão (2000) as propriedades mecânicas do material e da ferramenta influenciam na operação de corte, sendo relativamente alta as forças envolvidas no processo. Tais dificuldades encontradas podem causar defeitos, como trincas,

tensões superficiais, rugosidade, queda da resistência mecânica ou perda das propriedades do aço.

Uma possível alternativa para melhorar o grau de usinabilidade dos metais, seria submeter a peça a um aumento de temperatura antes de realizar o processo de torneamento.

Segundo Spinelli Junior (2004) o uso desta técnica de aquecer o material reduziria as tensões de cisalhamento, possibilitando que materiais com maior rigidez fossem torneados com ferramentas convencionais.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o processo de torneamento a quente, utilizando resistências infravermelho em cerâmica, sob diferentes condições de temperaturas e avanços na remoção de material.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Comparar com a literatura existente, as vantagens advindas da redução das forças de corte, redução da potência aplicada no procedimento e as formas de cavacos gerados no processo.

Verificar e comparar os possíveis efeitos superficiais que podem ocorrer com a aplicação dessa técnica, bem como a facilidade no manuseio e aplicação dessas resistências na máquina.

## **1.3 Justificativa**

A busca por alternativas mais econômicas tem impulsionado diversos estudos sobre o processo de torneamento a quente, pois esse método diminuiria o gasto de energia, aumentaria a vida da ferramenta de corte, diminuiria os esforços para máquina operatriz e melhoraria o processo de geração de cavaco e acabamento superficial.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho realizado é segmentado em oito partes: introdução, conceitos gerais e revisão da literatura, metodologia e o cronograma, desenvolvimento, resultados obtidos, conclusões, sugestões para trabalhos futuros e anexos.

Na introdução é dada uma visão geral dos processos de usinagem e o objetivo da realização deste estudo, que seria a usinagem a quente no torneamento. Na revisão bibliográfica é abordada toda a base teórica envolvendo o assunto, para possibilitar a avaliação dos resultados e fornecer um entendimento sobre os problemas envolvidos.

A metodologia consiste em apresentar o cronograma e os métodos que serão utilizados para a realização dos experimentos. Na fase do desenvolvimento é descrito todos os experimentos, máquinas e ferramentas utilizadas. Na etapa dos resultados será descrita os dados provenientes dos experimentos, seguida pelas conclusões com base na revisão bibliográfica.

Por se tratar de um assunto recente na literatura, o presente trabalho não aborda todas as variáveis presentes nos experimentos, sendo que estas foram sugeridas para trabalhos futuros.

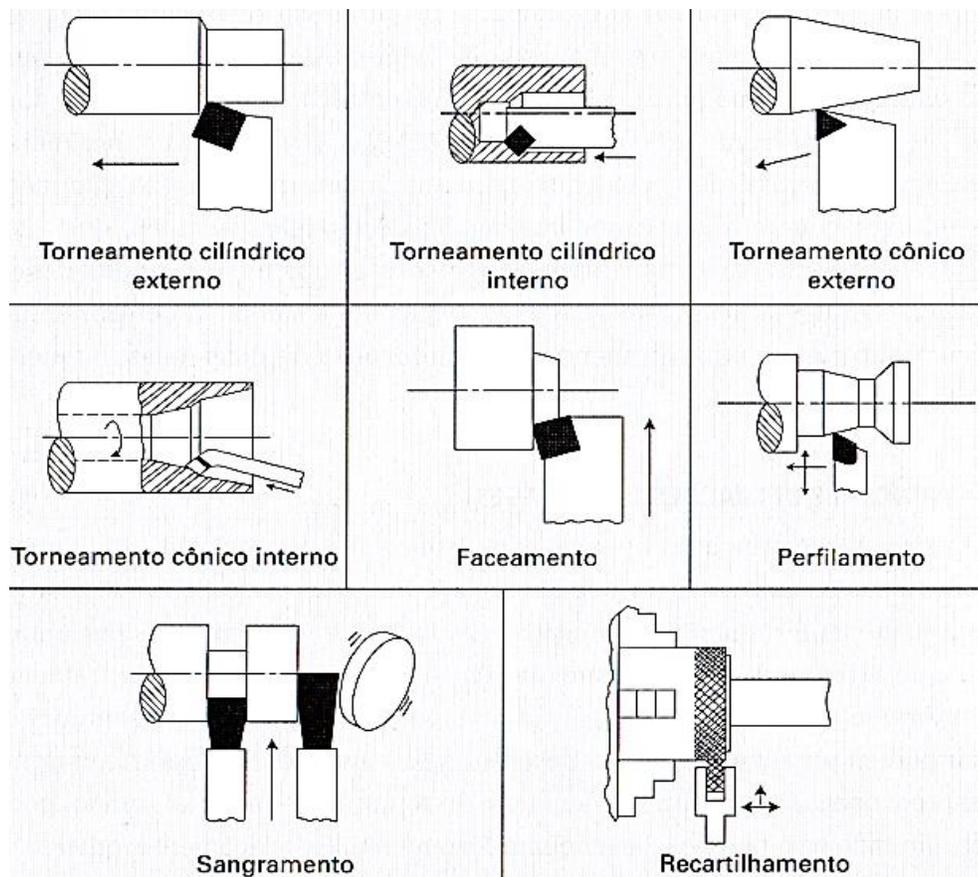
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A usinagem de materiais pode ser definida como um processo que origina novas formas e dimensões aos materiais trabalhados. Segundo Trent e Wright (2000) a usinagem é responsável pela maioria das formas utilizadas atualmente na engenharia.

Conforme Ferraresi (1970) o torneamento é um processo mecânico de usinagem que tem por objetivo obter superfícies trabalhadas através de revoluções, na qual a peça rotaciona em torno do eixo principal da máquina ferramenta.

No processo de torneamento, os esforços atuantes na remoção de material são diretamente proporcionais à potência exigida pelo motor do eixo árvore da máquina. Na Figura 1 são destacadas as diversas operações realizadas no torno, como o torneamento: cilíndrico interno e externo, cônico interno e externo, faceamento, perfilamento, sangramento e recartilhamento.

Figura 1 - Principais operações executadas no torno.



Fonte: Machado et al. (2011).

Com o intuito de esclarecer estes aspectos, esta revisão da literatura existente envolve alguns aspectos presentes na usinagem, como:

- Potências e forças de corte necessárias na usinagem;
- Remoção de material e formação de cavaco no processo;
- Rugosidade superficial;
- Usinabilidade dos materiais;
- Técnica referente a usinagem a quente e material necessário envolvido.

## **2.1 Potências e forças de corte necessárias na usinagem**

A potência consumida durante o processo de usinagem serve para girar seu eixo árvore, executando dessa forma o movimento de avanço e corte. Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2010) a força, nada mais é do que a ação da peça a ser trabalhada sobre a ferramenta.

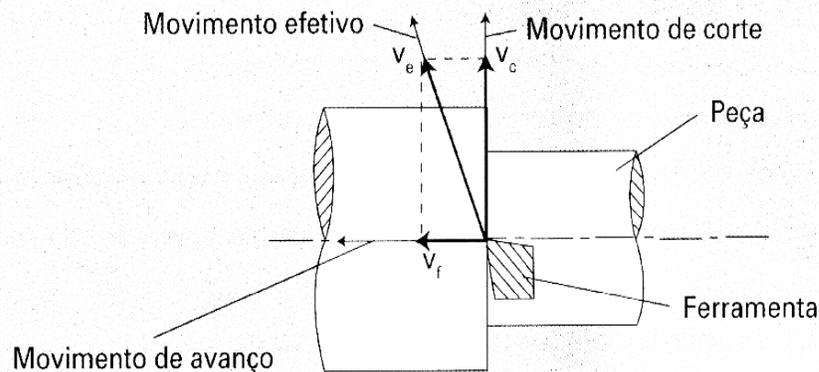
Além do uso destas informações estimar a potência requerida para executar o corte, elas devem ser consideradas no projeto das máquinas ferramentas para o correto dimensionamento das estruturas, dos acionamentos da fixação de ferramentas, das guias e de outros elementos (Spinelli Junior, 2004, p. 22).

As forças de corte apresentam as mais diversas variações de acordo com as condições de trabalho podendo ser influenciada, por exemplo, pela dureza do metal, velocidade de rotação da máquina, profundidade de corte e velocidades de avanço.

É necessário o conhecimento do comportamento das forças de corte, pois estas afetam a potência que será necessária, sendo uma medida utilizada para o dimensionamento da máquina ferramenta e que possui influência direta sobre as tolerâncias, temperatura e desgaste da ferramenta. (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010)

Na Figura 2 pode-se analisar a direção dos movimentos de corte, efetivo e avanço no torneamento, realizado pela ferramenta de corte, onde  $V_e$  é a velocidade efetiva,  $V_c$  a velocidade de corte e  $V_f$  a velocidade de avanço.

Figura 2 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no torneamento.



Fonte: Machado et al. (2009).

Segundo Machado et al (2011) os três componentes básicos da força de usinagem podem ser definidos como:

- Força de corte ( $F_c$ ) pode ser definida como a projeção da força de usinagem na direção do corte da ferramenta, fornecida pela velocidade de corte.
- Força de avanço ( $F_f$ ) é a projeção da força do torneamento, dada pela velocidade de avanço da ferramenta sobre o plano de trabalho.
- Força passiva ou de profundidade ( $F_p$ ) é conhecida como a força perpendicular ao plano de corte no torneamento.

É de relevante importância o conhecimento de todos os componentes no plano de trabalho. Como afirmado por Ferraresi (1970) “estas forças encontram aplicação no cálculo da estrutura e dos mecanismos de acionamento das máquinas operatrizes, permitem o cálculo da potência de usinagem e conseqüentemente cargas e velocidades de trabalho”.

As forças de corte relativas ao processo podem ser influenciadas por diversos fatores, como o material da peça ou presença de elementos de liga, que na maioria das vezes, quanto maior a dureza, maior será a força aplicada. Segundo Nascimento e Abrão (2000) a geometria de corte das ferramentas tem uma influência sobre o desempenho da ferramenta de corte.

A potência requerida na usinagem, segundo Machado et al (2011, p. 121) resulta da soma das potências necessárias para cada componente da força de usinagem, bem como do produto da velocidade pela força e pelo cosseno do ângulo entre ambas. Em outras palavras, a potência da usinagem é influenciada pelos

componentes de corte e avanço. Abaixo pode-se verificar as equações (1) e (2) da potência de avanço e da potência de corte:

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{6,0 \times 10^7} \text{ [kW]} \quad \dots(1) \quad P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6,0 \times 10^4} \text{ [kW]} \quad \dots(2)$$

Onde:

$F_f$  é a força de avanço (N);

$F_c$  é a força de corte (N);

$v_f$  é a velocidade de avanço (m/mim);

$v_c$  é a velocidade de corte (m/mim).

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2010) a determinação da velocidade de avanço pode ser através da equação (3):

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ [m/min]} \quad \dots(3)$$

Onde:

$d$  é o diâmetro medido em metros (mm);

$n$  é a rotação de giro por minuto da máquina (RPM).

O mesmo autor também determina a força de corte ( $F_c$ ) através da equação (4) abaixo:

$$F_c = K_S \cdot A \text{ [N]} \quad \dots(4)$$

Onde:

$K_S$  é a pressão específica de corte (N/mm<sup>2</sup>);

$A$  é a área da seção de corte (mm<sup>2</sup>).

Os fatores que podem influenciar a pressão específica de corte é o material da peça, o material e geometria da ferramenta, segundo Souza (2011) equivale a energia

de corte por unidade de volume. No processo de torneamento a área da seção de corte é obtida através da equação (5) a seguir:

$$A = b \cdot h = a_p \cdot f \text{ [mm}^2\text{]} \quad \dots(5)$$

Onde:

$a_p$  é a profundidade de corte (mm);

$f$  é a velocidade de avanço (mm/volta).

Analisando as equações (1) a (5), pode-se observar que as potências de corte da máquina são relativamente menores que as potências de avanço, sendo necessário no processo de torneamento observar as condições de corte, com a velocidade, o avanço e a profundidade.

Conforme Machado et al (2011), a potência exigida na usinagem também pode ser medida através da tensão e da corrente elétrica consumida. A potência instantânea pode ser calculada pela equação (6) por:

$$P_i = V(t) \cdot I(t) \text{ [W]} \quad \dots(6)$$

Onde:

$V(t)$  é a voltagem (V) em relação ao tempo;

$I(t)$  é a corrente elétrica (A) em relação ao tempo.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2010), nas máquinas operatrizes que apresentam um único motor para os movimentos de corte e avanço, sendo  $P_c$  muito maior que  $P_f$ , despreza-se  $P_f$  e calcula-se  $P_m$  pela equação (7) como:

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \text{ [W]} \quad \dots(7)$$

Onde:

$P_m$  é a potência fornecida pelo motor (W);

$\eta$  é o rendimento da máquina operatriz.

Segundo o mesmo autor, os rendimentos em máquinas convencionais que possuem engrenagens para transmissão de movimento estão situados na faixa de 60 a 80%, diferente de máquinas CNC com 90%, pois necessitam de poucos ou nenhum elemento de transmissão em seu sistema, diminuindo perdas de trabalho.

A indústria metal mecânica é dependente da energia elétrica para que ocorra o processo produtivo; portanto, com a redução no consumo seria possível tornar o processo mais econômico e rentável.

Segundo Spinelli Junior (2004), é de extrema importância fazer a escolha certa quanto aos parâmetros nos processos de usinagem, pois estes influenciam em diversos fatores, como a qualidade.

A retirada de material exige elevada potência de trabalho da máquina que conforme Souza (2011), no corte realizado com ferramenta de geometria definida, cerca de  $\frac{3}{4}$  da energia total é dispensada durante o cisalhamento do cavaco na zona de deformação primária.

## **2.2 Remoção de material e formação de cavaco no processo**

Conforme Machado et al. (2011, p. 57), sabe-se que o cavaco é formado em altíssimas velocidades de deformação, seguidas de ruptura do material da peça. O cavaco influencia em diversos fatores como: as forças de corte, desgaste da ferramenta, o calor gerado no processo, rugosidade superficial, entre outros.

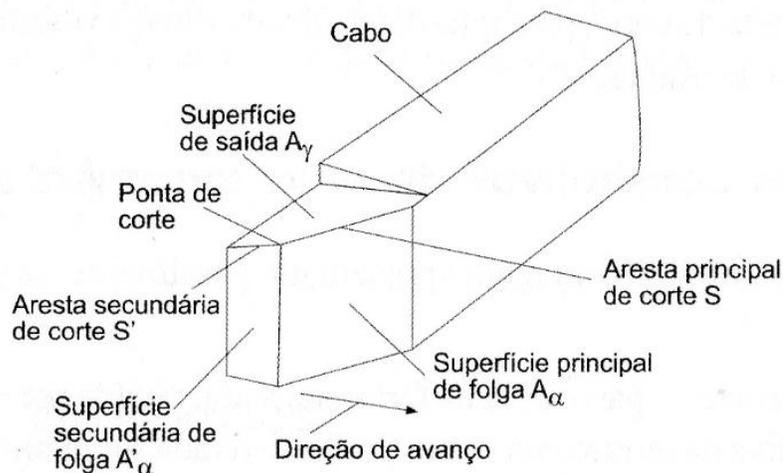
De acordo com Ferraresi (1970), para um estudo detalhado do processo de formação de cavaco, é necessário adquirir conhecimento sobre as grandezas relacionadas, como o desgaste da ferramenta e suas causas, a força de corte, entre outras.

Um fator muito importante é geometria da ferramenta de corte que segundo Amorim (2002), é um dos principais fatores de influência no processo de torneamento. Garantir uma boa qualidade desse instrumento de trabalho pode acarretar em menores desgastes da ferramenta em trabalho.

A retirada de material da peça ocorre no plano de cisalhamento, ou seja, onde ocorre a deformação do material. Conforme Sanches (2011), quanto menor este ângulo de cisalhamento, maior é a deformação imposta ao material usinado, maiores

são os esforços atuando na ferramenta e, conseqüentemente, maior, a demanda de energia por parte do sistema. Na Figura 3 que segue abaixo foi destacado os elementos da ferramenta de corte.

Figura 3 - Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma ferramenta de torneamento.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 2010.

É possível dividir os processos de fabricação quanto a retirada de material, havendo ou não a formação de cavaco. A usinagem faz parte do grupo que produz excedentes e pode ser subdividida em processos convencionais e não convencionais. O processo de torneamento, abordado no presente estudo faz parte dos métodos convencionais da usinagem, assim como o fresamento, aplainamento, furação, roscamento, retificação, entre outros.

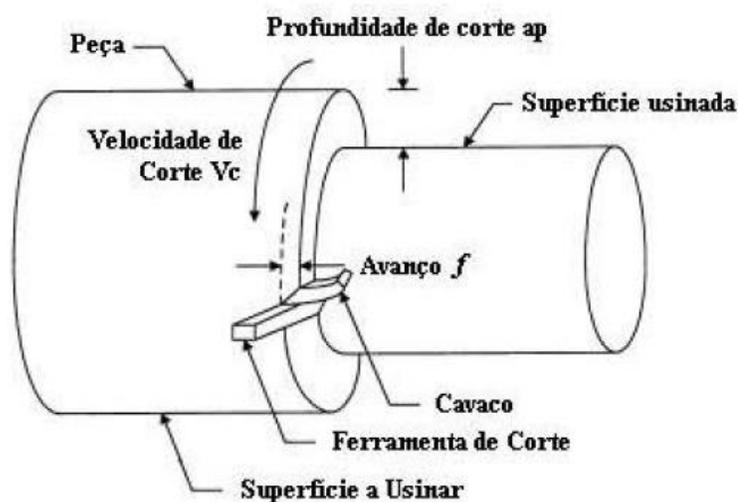
De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2010), o fenômeno da formação de cavaco pode ser dividido da seguinte forma:

- Uma porção de material é empurrada contra a superfície de saída da ferramenta de corte;
- A deformação plástica aumenta progressivamente, até que as tensões causem a ruptura do material, iniciando um deslizamento entre a porção de material recalcada e a peça;
- Ruptura parcial ou completa do cavaco decorrente da penetração da ferramenta, depende da ductilidade e das condições de usinagem;

- Saída de cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça.

Na Figura 4 pode-se analisar o processo de torneamento de um cilindro, como a direção da velocidade de corte, ferramenta, profundidade de corte e a geração de cavaco gerando a superfície usinada.

Figura 4 - Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo.



Fonte: Amorim, 2002.

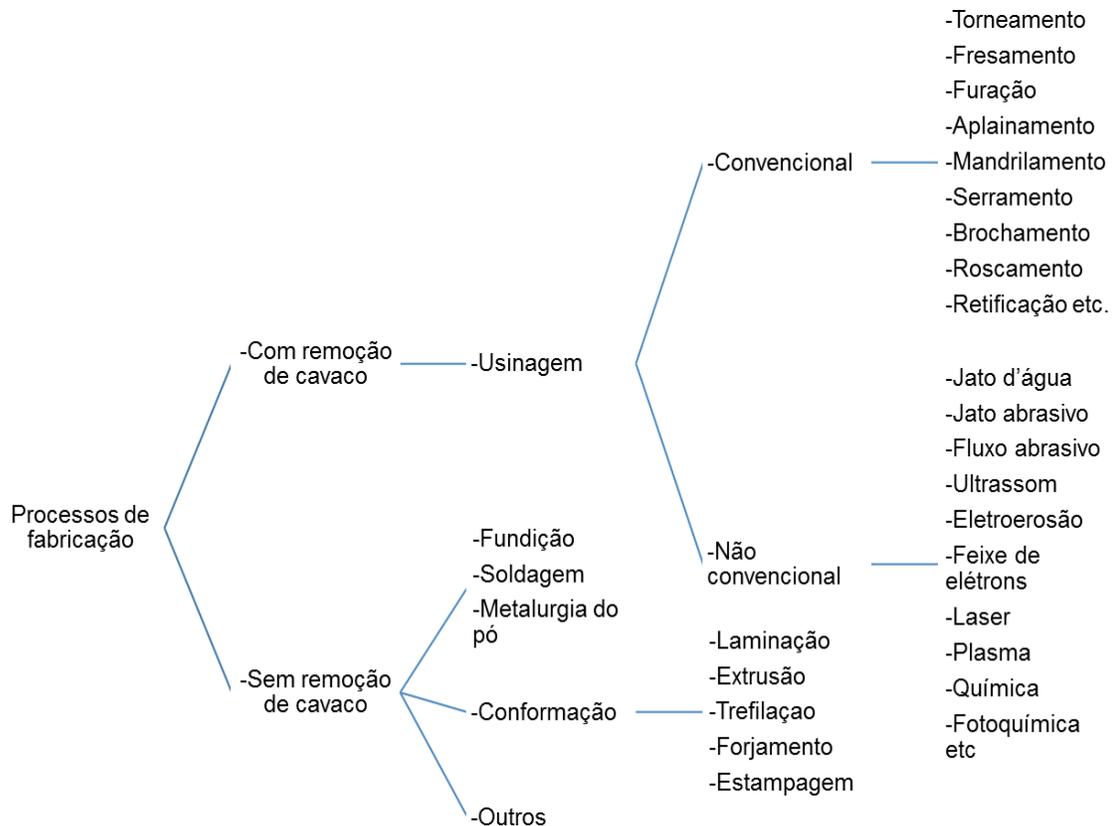
Segundo Souza (2011), a formação de cavaco tem influência sobre diversos fatores de grande importância, como: desgaste da ferramenta, forças de corte, calor gerado. Os tipos de cavacos gerados possuem uma relação direta com os parâmetros de corte e o material da peça.

Os cavacos também podem ser definidos quanto a sua forma, segundo Machado et al (2009, p. 55), podem ter a seguinte classificação: em fita, helicoidais, em espiral, em lascas ou pedaços.

Já Amorim (2002), diz que os tipos de cavacos são basicamente três: cavaco contínuo, de cisalhamento ou parcialmente contínuo, e arrancado ou descontínuo. O mesmo autor afirma que o cavaco contínuo oferece perigo ao operador, pois pode ocorrer de se enrolar ao redor da peça ou ferramenta e além disso, também conta a grande quantidade de volume ocupado.

Na Figura 5 é possível classificar os processos de fabricação quanto a retirada de cavaco que ocorrem na usinagem. Como pode ser observado existem diversos tipos de técnicas de fabricação, na qual o principal parâmetro que pode ser analisado é o processo com e sem remoção de material da amostra.

Figura 5 - Classificação dos processos de fabricação.



Fonte: Adaptado de Machado et al.,2011.

A armazenagem do cavaco, junto com a sua incorreta forma de manuseio, pois é um problema em indústrias. Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2010), afirmam que a forma do cavaco gerado pode ter implicações diretas como:

- Segurança do operador;
- Dano a ferramenta e a peça;
- Manipulação e armazenamento do cavaco;
- Forças de corte, que influenciam na temperatura e vida da ferramenta.

Um problema bastante evidente na formação de cavaco são as grandes temperaturas encontradas na área de corte. Esse aumento de temperatura observado

no processo de usinagem é por consequência da deformação e do cisalhamento na retirada do cavaco, o atrito gerado entre o cavaco e a ferramenta; e a ferramenta e a peça. (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2010)

Esse problema torna-se mais intenso quando novas gerações de ferramentas mais resistentes ao desgaste permitem o uso de altas velocidades de corte em máquinas CN, em sistemas produtivos altamente automatizados, com mínima supervisão humana. (MACHADO et al., 2011, p. 73)

Um estudo sobre o assunto encontraria meios para minimizar tais dificuldades encontradas na retirada de cavaco, como ferramentas mais resistentes as altas variações de temperaturas, ou a empregabilidade de metais mais usináveis.

### **2.3 Rugosidade superficial**

A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros micro geométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta de corte, desgaste da ferramenta, etc.). (MACHADO et al, 2011, p. 299)

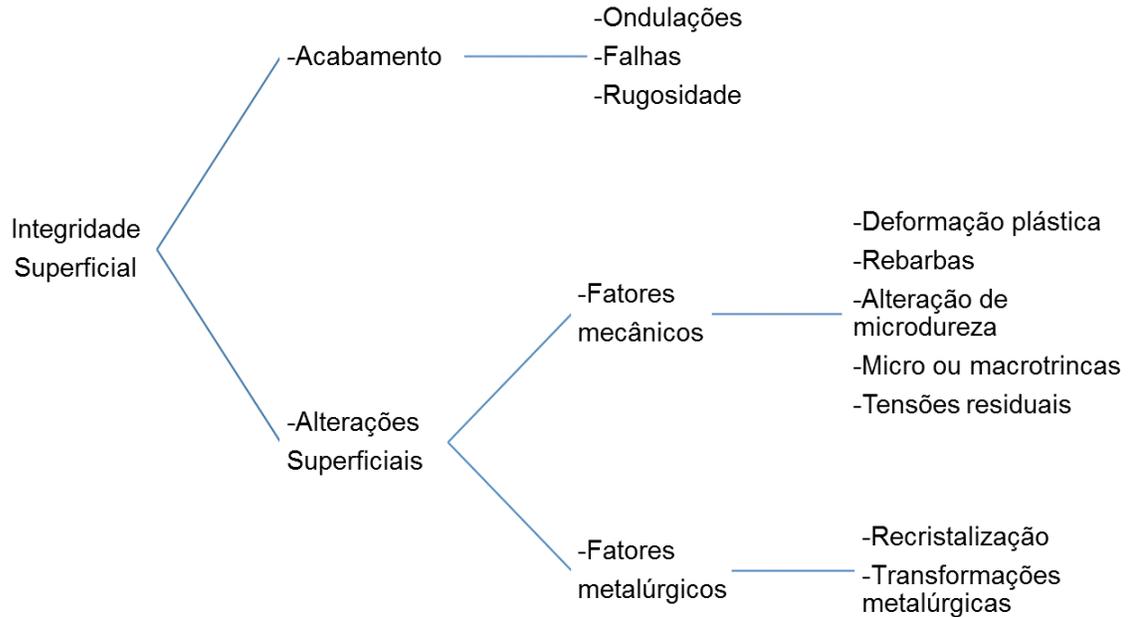
O acabamento superficial sofre influência de diversos parâmetros de usinagem, incluindo: geometria de corte e da peça, rigidez da máquina-ferramenta, material da peça e da ferramenta, condições de corte. (SANTOS e SALES, 2007, p. 211)

O acabamento superficial tem relação direta com aplicações na indústria, variando conforme o material e a sua função. Na avaliação do índice de rugosidade, pode-se definir sua usinabilidade. Segundo Ferraresi (1970, p. 595), verifica-se experimentalmente que materiais manufaturados nas mesmas condições de usinagem, com a mesma ferramenta e máquina operatriz, apresentam rugosidades superficiais diferentes.

Segundo Gosai e Bhavsar (2016), o acabamento da superfície, a estrutura metalúrgica da peça e da ferramenta de corte podem ser afetadas devido às altas temperaturas na área de corte.

A integridade superficial abrange todas as características da superfície, como também fatores mecânicos ou metalúrgicos. Na Figura 6 pode-se observar o conceito de integridade superficial

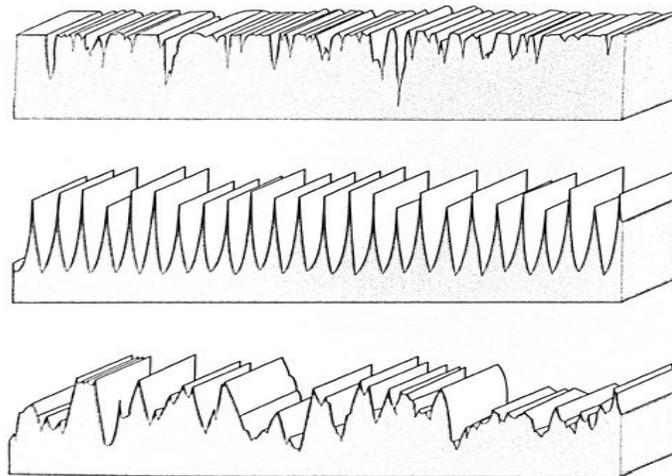
Figura 6 - Classificação da integridade superficial.



Fonte: Adaptado de Machado et al., 2011.

A peça usinada é avaliada em função de sua geometria, micro ou macro geométrica, na qual a rugosidade superficial pode ser entendida como uma medida micro geométrica. A Figura 7 destaca diferentes geometrias para o mesmo valor de Ra.

Figura 7 - Representação de diferentes superfícies com o mesmo valor de Ra.



Fonte: Machado et al. (2011).

Segundo Machado et al (2011, p. 305), no processo de torneamento, se o avanço ( $f$ ) é menor que o raio de ponta ( $r_e$ ) da ferramenta, os valores de  $R_a$  e  $R_t$  são calculados pela equação (8) e (9), aproximadamente, por:

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3}.r_e} \quad \dots(8) \quad R_t = \frac{f^2}{8.r_e} \quad \dots(9)$$

Para o caso em que a ferramenta não tenha raio de ponta, ou se esse é muito pequeno, pode-se obter os valores da seguinte forma pelas equações (10 e (11):

$$R_a = \frac{f}{4(\tan\theta_s + \cot\theta_e)} \quad \dots(10) \quad R_t = \frac{f}{\tan\theta_s + \cot\theta_e} \quad \dots(11)$$

Para o caso em que a ferramenta tenha raio de ponta menor que o avanço, pode-se obter  $R_t$  através da equação (12):

$$R_t = (1 - \cos\theta_e)r_n + f.\text{sen}\theta_e.\text{cos}\theta_e - (2.f.r_n.\text{sen}^3\theta_e - f^2.\text{sen}^4\theta_e)^{1/2} \quad \dots(12)$$

Onde:

$R_a$  é a média aritmética dos valores do perfil;

$R_t$  é a soma da maior altura de pico com a maior profundidade de vale.

A rugosidade superficial do torneamento está relacionada a diversos fatores que conforme Ferraresi (1970), depende do raio, do avanço, do material da peça e ferramenta, dos tipos de máquina operatriz, dos fluidos necessários durante o processo, entre outros.

## 2.4 Usinabilidade dos materiais

Usinabilidade é um termo bastante usado no estudo dos processos de usinagem, diz respeito tanto ao material da peça quanto ao da ferramenta e as variáveis de processo envolvidas no corte dos metais. (AMORIM, 2002, p. 36)

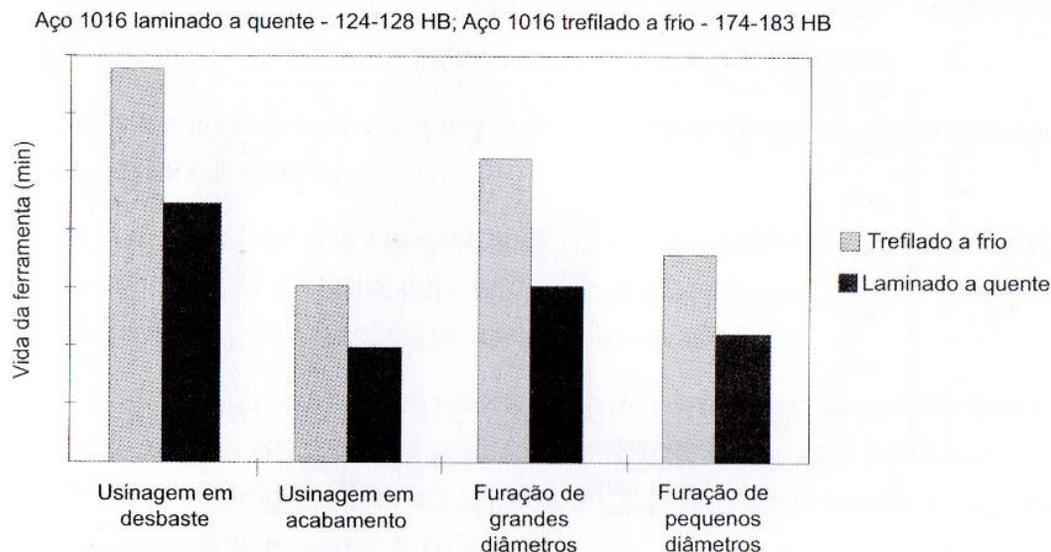
De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2010, p. 151), pode-se entender usinabilidade como o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. Já

Ferraresi (1970), define como uma grandeza que é expressa por meio de um valor comparativo as propriedades de um determinado tipo de metal, em referência a outro que é tido como padrão.

Segundo Souza (2011), a usinabilidade é um conjunto de propriedades que influencia sobre a vida da ferramenta de corte e os esforços, o acabamento superficial, a temperatura durante o corte, a produtividade do processo e as características dos cavacos. O mesmo autor afirma que algumas propriedades desses materiais podem influenciar no processo de fabricação, como: a dureza, resistência mecânica, ductilidade, condutividade térmica e taxa de encruamento

As propriedades dos materiais a serem trabalhados definem como será o rendimento da usinagem, podendo exigir ou não maiores esforços da máquina ferramenta. Com a Figura 8 pode-se comparar a vida da ferramenta para um aço 1016 (baixo carbono) trefilado a frio e outro aço laminado a quente.

Figura 8 - Efeito do encruamento (por trefilação a frio) na vida da ferramenta.



Fonte: Diniz, Marcondes, Coppini, 2010.

A adição de ligas nos metais, pode facilitar ou prejudicar a usinabilidade destes, podendo causar impactos sobre a forma do cavaco gerado no processo. Na Tabela 1, pode-se observar algumas ligas que foram acrescentadas ao alumínio, influenciando em sua usinabilidade.

Tabela 1 - Elementos de liga e suas influências na usinabilidade do alumínio.

Elementos de Liga	Influência na usinabilidade
Sn, Bi e Pb	Atuam como lubrificante e como fragilizadores do cavaco
Fe, Mn, Cr e Ni	Combinam entre si ou com o alumínio e/ou com silício, para formarem partículas duras, que favorecem a quebra do cavaco e que, em grande quantidade, tem efeito abrasivo sobre a Ferramenta
Mg	Em teores baixos (cerca de 0,3%) aumenta a dureza do cavaco e diminui o coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta
Si	Aumenta a abrasividade da peça - a vida da ferramenta diminui com o aumento do tamanho da fase primária do silício
Cu	Forma o intermetálico CuAl <sub>2</sub> que fragiliza o cavaco
Zn	Não exerce influência na usinabilidade

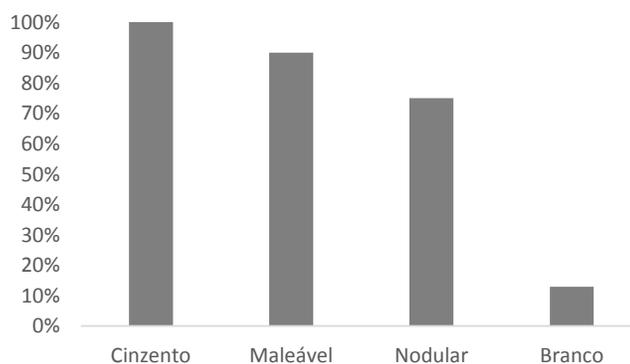
Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes, Coppini (2010).

Como abordado por Amorim (2002), o material do qual a peça é constituída apresenta diversos fatores que influenciam na usinabilidade, sendo os de maior relevância a composição química, que nada mais é do que os elementos de liga presentes e as propriedades do material.

O critério para avaliação da usinabilidade é relativo, conforme Trent e Wright (2000), um determinado tipo de material pode ter boa usinabilidade de acordo com certo critério; porém, se for observado outro parâmetro poderá ser considerado ruim, podendo também variar conforme o método de realização da operação.

A Figura 9 destaca uma variação de diferentes graus de usinabilidade para alguns tipos de ferros fundidos, sendo destacado o ferro fundido cinzento, o maleável, o nodular e o branco.

Figura 9 - Usinabilidade dos diversos tipos de ferros fundidos.



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes, Coppini, 2010.

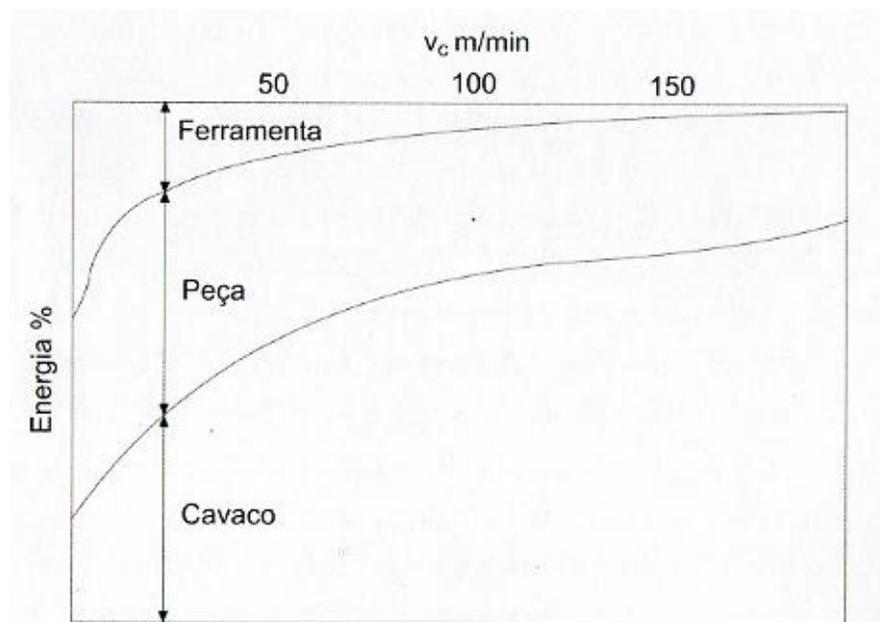
## 2.5 Técnica referente a usinagem a quente e material necessário

Como descrito na seção anterior, as propriedades do material e sua composição química podem influenciar no processo de fabricação. Conforme Spinelli Jr. (2004), o aquecimento do material da peça surge como uma alternativa para diminuir a tensão de cisalhamento do material, causando como consequência a diminuição dos esforços na usinagem. Ainda conforme o autor, além da redução das forças de corte, ocorreria um aumento na taxa de remoção de material e vida útil e uma melhora no acabamento da superfície trabalhada.

Uma grande parte da energia consumida na usinagem de metais é convertida em calor próximo a aresta de corte da ferramenta, causando problemas técnicos e econômicos devido em grande parte por conta do aquecimento. (TRENT e WRIGHT, 2000)

Na Figura 10 pode-se destacar esse consumo de energia na geração de cavaco, na peça e na ferramenta de corte, relacionado com diferentes velocidades de corte aplicadas no processo.

Figura 10 - Variação da distribuição da energia de corte com a velocidade.



Fonte: Diniz, Marcondes, Coppini, 2010.

De acordo com Souza (2011), os materiais com baixa dureza são possíveis de usinar com maiores velocidades de corte, avanço e profundidade. Além disso, estes

apresentam uma maior vida da ferramenta cortante, seguido de taxas de retirada de material maiores a custos de operação menores.

Com base nisso, é possível relacionar o custo com a quantidade de material retirado no processo. No intuito de minimizar tais problemas, podem ser empregados métodos ainda pouco explorados no setor industrial como o aquecimento do material antes do processo.

De acordo com Spinelli Junior (2004, p. 35), os tipos de calor mais comuns são:

- Forno;
- Resistências elétricas;
- Chama;
- Indução eletromagnética;
- Arco elétrico;
- Corrente elétrica entre a peça e a ferramenta;
- Arco de plasma;
- Laser.

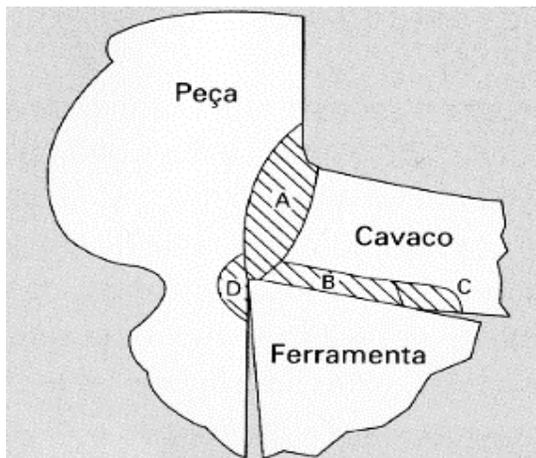
Outro fato importante a ser destacado são as características dos materiais, bem como suas propriedades físicas podem influenciar na temperatura. Conforme Ferraresi (1970, p. 632), em iguais condições de usinagem o trabalho de uma determinada ferramenta em alumínio origina uma temperatura de corte sensivelmente menor que em um aço de alta liga.

A formação de cavacos exige uma enorme demanda de energia que segundo Machado et al. (2009), pode ser percebida em três diferentes locais:

- Região A, onde ocorre a zona primária de cisalhamento;
- Região B e C, interface entre o cavaco e a saída da ferramenta;
- Região D, ocorre entre o contato da peça com a superfície de folga da ferramenta.

Na Figura 11 pode-se identificar as diferentes regiões de calor encontrados durante a remoção de material na usinagem.

Figura 11 - Regiões onde o calor é percebido durante a formação de cavacos.



Fonte: Machado et al., 2009.

Segundo Ranganathan e Senthilvelan (2010), afirmam que o processo de usinagem a quente foi desenvolvido em indústrias com o intuito de remover maiores taxas de materiais, sem que este influenciasse em parâmetros como a qualidade final da peça trabalhada. Já de acordo com Tosun e Ozler (2004), é preciso a escolha certa do método de aquecimento para que não ocorra mudanças indesejáveis na peça, podendo aumentar o custo do processo.

Conforme afirmado anteriormente, a escolha do método de aquecimento adequado é imprescindível e pode ser de dois tipos: o aquecimento localizado e distribuído. Como o próprio nome sugere, no aquecimento localizado é apenas aquecida uma camada da peça antes de sua remoção e no aquecimento distribuído, toda peça é aquecida, podendo provocar dilatação do metal e distorções.

De acordo com Spinelli Junior (2004), foi notado que hoje os métodos mais vistos podem ser descritos como corrente elétrica entre a ferramenta e peça, arco de plasma e o laser (LAM).

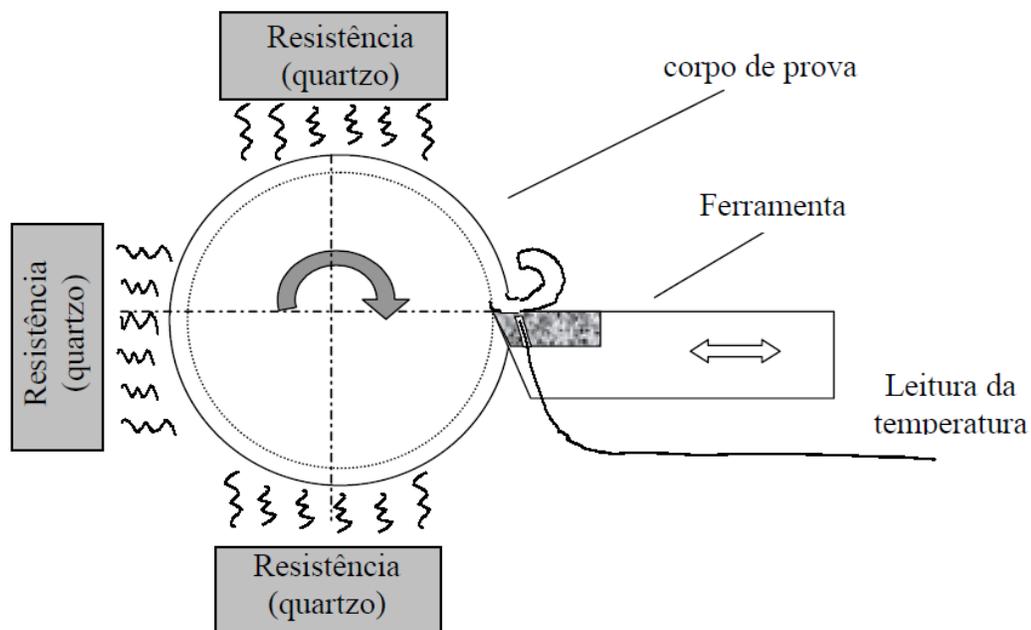
No método de aquecimento através de corrente elétrica o material é aquecido na região de corte, no qual apenas uma área é aquecida e facilmente adaptada na máquina ferramenta. Porém, esse procedimento pode vir a causar danos nas propriedades do metal, devido ao aquecimento.

No método de aquecimento por plasma, a superfície anterior ao corte é amolecida por uma tocha de gás incidente sobre o local e o aquecimento por chama ocorre de forma semelhante, sendo posicionado um maçarico sobre a peça.

Alguns métodos de aquecimento dos metais antes de serem submetidos a usinagem já foram aplicadas, além destes, também foi visto o procedimento com o uso de resistências elétricas em experimentos. Segundo Mello et al. (2002), realizou a usinagem de corpos de prova que foram aquecidos por uma fonte infravermelha de calor produzida por resistências a quartzo.

A Figura 12 mostrada abaixo faz uma representação esquemática de como seria realizado o experimento com o uso de resistências. É possível observar o posicionamento da peça ser torneada com relação as resistências elétricas em quartzo, de forma que não tenha nenhum contato com a ferramenta de corte durante a retirada de material.

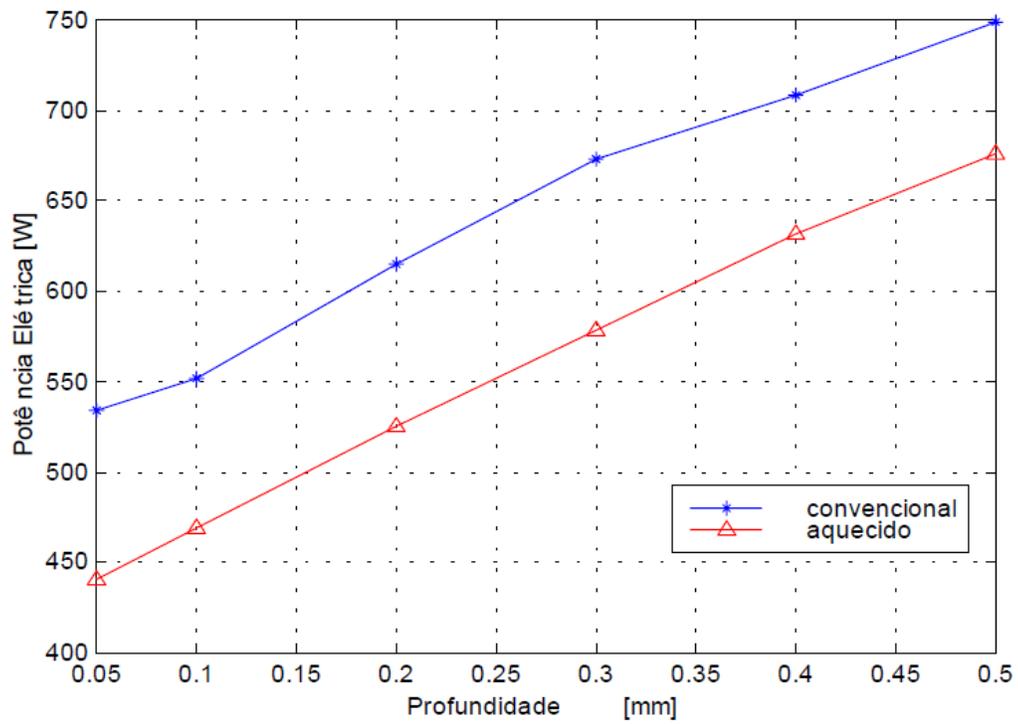
Figura 12 - Representação esquemática do experimento.



Fonte: Mello et al., 2002.

Conforme Mello et al. (2002), houve uma redução de potência consumida ao submeter o corpo de prova ao aquecimento. Na Figura 13 relaciona-se a profundidade de corte com a potência consumida durante o processo sob diferentes temperaturas, comparando o método convencional com o torneamento a quente.

Figura 13 - Potência elétrica no torneamento a quente e convencional para diferentes profundidades de corte.



Fonte: Mello et al., 2002.

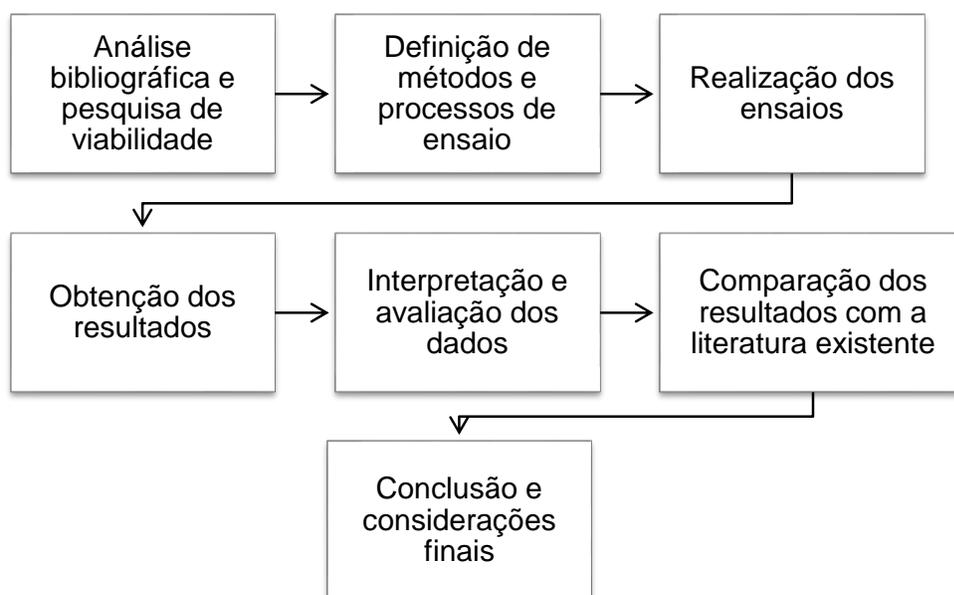
### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos as respectivas etapas e procedimentos para caracterização dos materiais, métodos e ensaios laboratoriais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. O início do trabalho se deu na especificação dos materiais e peças que foram usinadas no processo de torneamento a quente com auxílio de resistências infravermelho em cerâmica.

A verificação das modificações que essa aplicação se deu por meio da medição da potência consumida pelo torno mecânico, tal como a verificação da rugosidade superficial da peça, em comparação à peça usinada sem o processo de aquecimento. O cavaco, material removido no processo de usinagem, será examinado em sua forma para comparação com a literatura existente, principalmente com a norma ISO 3685, definindo sua classificação e características da peça usinada.

Outro aspecto que foi analisado é a usinabilidade do metal quando submetido a esse aumento de temperatura, verificando a dificuldade na execução do processo de torneamento a quente. Na Figura 14 está discriminado as etapas e métodos do desenvolvimento deste trabalho.

Figura 14 - Organograma de atividades.



Fonte: Próprio Autor.

No seguinte trabalho a metodologia empregada para cada etapa do trabalho é descrita abaixo, na qual para a realização e conclusão do trabalho foi necessária muita pesquisa e aplicações práticas dos conhecimentos descritos a seguir:

#### 1. Revisão Bibliográfica

Foi feita com base em diversas pesquisas sobre o assunto, com o intuito de obter um melhor entendimento teórico sobre a área;

#### 2. Caracterização dos Materiais

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram preparados conforme citado anteriormente, com base em normas técnicas;

#### 3. Ensaios de Laboratório

A realização dos ensaios se deu com o intuito de avaliar o que irá ocorrer no material após submetido a elevadas temperaturas e logo após ser torneado;

#### 4. Análise dos Resultados

Foram avaliados todos os parâmetros encontrados após os ensaios, como verificar a potência exigida da máquina ferramenta, o acabamento superficial da peça trabalhada, os tipos de cavacos gerados no processo e a usinabilidade demonstrada com a aplicação da nova técnica;

#### 5. Considerações Finais

Realizou-se intensa apuração e comparação dos dados coletados nos ensaios laboratoriais, sendo estes comparado com a literatura existente, com o objetivo de verificar se houve melhorias no torneamento aquecido com resistências.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Nessa fase do trabalho serão apresentadas todas as etapas que pertencem ao desenvolvimento, sendo estas:

- Resistências e suporte;
- Material e equipamento utilizado;
- Parâmetros adotados nos experimentos e procedimento experimental.

### 4.1 Suporte das Resistências Infravermelho em Cerâmica

O material utilizado na construção do suporte pertencia ao laboratório do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete. Foram utilizadas cantoneiras no processo, as quais foram cortadas e lixadas e posteriormente feito furos para prender as resistências. Também foi feita uma adaptação de cabos de fios duplos de energia com a finalidade de possibilitar o seu uso.

As duas resistências infravermelho em cerâmica possuem uma potência nominal de 500 W e uma tensão nominal de 220 V cada, fabricadas pela indústria ELETROTHERMO. A Figura 15 mostra o modelo da resistência elétrica plana utilizada no experimento, na qual sua potência nominal foi de 500 W.

Figura 15 - Emissor Infravermelho em Cerâmica 2GQ.



Fonte: Adaptado Eletrothermo (2017).

Os elementos de aquecimento por radiação infravermelha em cerâmica oferecem uma melhor performance no gradiente de aquecimento e na inércia térmica

(site ELETROTHERMO, 2017). Na Tabela 3 são apresentados alguns dados técnicos referentes à resistência utilizada.

Tabela 2 - Dados técnicos referente a resistência plana utilizada no processo.

DADOS TÉCNICOS	
Temperatura máxima de trabalho contínuo:	Máx. 720°C
Picos máximos de temperatura:	Máx. 750°C
Densidade máxima de potência:	64 KW/m <sup>2</sup>
Potências padrão:	250W/400W/500W
Tensões de trabalho:	110V/220V/254V
Tipos de conexão:	Pino/Olhal/Faston
Isolação elétrica	10.000 VAC
Normas:	IEC 60335-1

Fonte: Adaptado Eletrothermo (2017).

Na Tabela 4 são apresentadas algumas informações relevantes quanto à temperatura que esses emissores em infravermelho são capazes de atingir com relação a potência nominal. Além disso, também destaca-se a emissividade da superfície do material.

Essas altas temperaturas só são possíveis de serem alcançadas devido ao material que esse mecanismo é fabricado, permitindo uma grande dispersão de energia em forma de calor através da radiação

Tabela 3 - Relação de temperatura x potência apresentada pela resistência plana.

TEMPERATURA			
Potência	250W	400W	500W
Temperatura típica de operação (superfície)	400°C	500°C	620°C
Emissividade	4 - 10 µm		

Fonte: Adaptado Eletrothermo (2017).

Além da resistência plana apresentada acima, também foi utilizada mais uma resistência em formato côncavo para realizar os experimentos laboratoriais, a qual pode ser visualizada na Figura 16.

Figura 16 - Emissor Infravermelho em Cerâmica 1FPC.



Fonte: Adaptado Eletrothermo (2017).

Na Tabela 5 são apresentados dados das resistências, nas quais aparecem as potências padrão, as tensões de trabalho ao qual podem ser submetidas, temperatura máxima e de pico, tipo de conexões, normas, entre outras características técnicas.

Tabela 4 - Dados técnicos referente a resistência côncava utilizada no processo.

DADOS TÉCNICOS	
Temperatura máxima de trabalho contínuo:	Máx. 720°C
Picos máximos de temperatura:	Máx. 1000°C
Densidade máxima de potência:	64 KW/m <sup>2</sup>
Potências padrão:	150W/200W/250W/ 300W/400W/500W
Tensões de trabalho:	110V/220V/254V
Tipos de conexão:	Pino/Olhal/Faston
Isolação elétrica	10.000 VAC
Normas:	IEC 60335-1

Fonte: Adaptado Eletrothermo (2017).

Foi escolhido um modelo a ser seguido, apresentado anteriormente no embasamento teórico, com base no trabalho de Mello et al. (2002), que demonstra como realizou a fixação das resistências em volta do torno mecânico.

Na Figura 17 pode ser visualizado a montagem do suporte das resistências no torno mecânico.

Figura 17 - Suporte de fixação das resistências.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 18 é possível observar a imagem das resistências fixadas sobre a peça que logo em seguida, foi dado início a retirada de cavaco da peça. A máquina de trabalho, torno mecânico pertence ao laboratório do curso de Engenharia Mecânica.

Figura 18 – Modelo construído para experimentos.



Fonte: Próprio Autor.

Uma observação importante a ser feita com relação aos emissores infravermelhos em cerâmica utilizados nos experimentos, é que apesar das mesmas apresentarem altas temperaturas de pico e de trabalho contínuo, isso não foi verificado na prática. No uso desse equipamento em laboratório foi observado uma faixa de temperatura logo acima de 600 °C, podendo chegar a 650 °C, em uma tensão

de 220 V, discordando com os dados apresentados acima obtidos no site do fabricante.

## 4.2 Material e Equipamento Utilizado

### 4.2.1 Material das Amostras

O material utilizado foi o aço ABNT 1045 disponível como material do laboratório. Este foi utilizado devido à sua grande variedade de aplicações, seja na indústria metal mecânica, ou na indústria de construção civil.

Após a escolha do tipo de aço de trabalho, uma barra de 19 mm de diâmetro, esta foi cortada na máquina Policorte em um padrão de 75 mm de comprimento, onde os dados técnicos podem ser analisados na Tabela 6.

Tabela 5 - Dados técnicos das amostras torneadas.

Material Amostras - Aço ABNT 1045		
Diâmetro [d]	Comprimento [l]	Comprimento Usinado [lu]
19 mm	75 mm	30 mm

Fonte: Próprio Autor.

Esse comprimento de usinagem foi adotado de forma que a maior parte da peça ficasse presa entre as castanhas do torno, para a mesma não ficar fora de centro durante seu torneamento. Na Figura 19 podem ser vistas as peças cortadas junto com o instrumento de medição utilizado, o paquímetro.

Figura 19 - Amostra e equipamento de medição.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.2 Cortadora Metalográfica

O processo de corte das amostras metálicas foi realizado através da cortadora metalográfica disponível no laboratório do curso, adquirida da empresa FORTEL, modelo CF III (com diâmetro de corte de 80 mm ou 100 mm) e pode ser observada através da Figura 20.

Figura 20 – (a) Cortadora metalográfica e em (b) vista interna dos componentes.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.3 Torno Mecânico

O torno mecânico utilizado nos ensaios foi adquirido da empresa CLARK Machine, modelo BV20B-Lx550. O equipamento possui uma capacidade de 550 mm de distância entre pontas, com avanço automático no sentido longitudinal, seis diferentes combinações de velocidades e três castanhas em sua placa.

As resistências elétricas infravermelho em cerâmica foram ajustadas logo acima das castanhas, dessa forma não interferiu no trabalho da ferramenta de corte durante a retirada de material.

Na Figura 21 pode ser visto o torno mecânico de bancada utilizado para realizar o acabamento da peça, como as alavancas para a escolha das rotações do eixo da máquina operatriz.

Figura 21 – (a) Dados técnicos do torno e (b) Torno Mecânico.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.4 Forno de Aquecimento Elétrico

O forno elétrico utilizado no aquecimento das amostras experimentais pertence a UNIPAMPA e possui uma interface computadorizada para realizar o controle de temperatura. A temperatura foi programada no computador conectado ao forno e foi escolhida uma rampa de aquecimento, a qual consiste na quantidade de graus por minuto que a temperatura irá crescer.

Na Figura 22 pode ser vista uma ilustração do forno e do computador utilizado no controle de temperatura.

Figura 22 – (a) Forno elétrico e (b) Interface no computador.



Fonte: Próprio Autor.

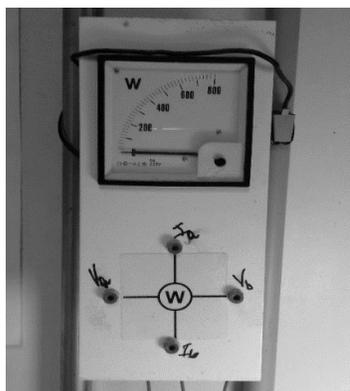
#### 4.2.5 Medidor de Potência

O experimento contou com um medidor de potência que foi diretamente adaptado aos fios da máquina, com o objetivo de acompanhar no visor o consumo durante a realização da retirada de cavaco.

Cabe ressaltar que a máquina consome 50 W apenas para manter seu motor ligado, sem realizar trabalho, e possui um motor trifásico que resulta em um consumo de 150 W.

Na Figura 23 pode ser observado o medidor de potência e sua adaptação no torno mecânico.

Figura 23 – Medidor de potência do experimento.



Fonte: Próprio Autor.

O medidor usado possui uma interface de marcação de 20 em 20 Watts de potência, sendo utilizado para medição em corrente alternada com leitura direta e classe de exatidão de 1,5%.

#### 4.2.6 Medidor de Temperatura

As temperaturas medidas durante o procedimento contaram com o medidor de temperatura, com pirômetro infravermelho de medição, modelo Fluke 62Max, observado na Figura 24.

O acompanhamento de temperatura com esse instrumento pôde ser realizado a uma certa distância, evitando possíveis acidentes devido às altas temperaturas que foram adotadas nesse estudo.

Figura 24 – Medidor de temperatura.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.2.7 Rugosímetro

Para realizar a medida de rugosidade superficial após a realização da retirada de material foi utilizado o Rugosímetro Digital. O rugosímetro utilizado é de grande qualidade, sendo que para realizar sua medição um sensor é colocado sobre a superfície, traçando um percurso a uma taxa constante.

O rugosímetro digital é da empresa HOMIS (Homis do Brasil), sua marca é TIME, o modelo é TR-200 e sua referência é H138-004. Na Figura 25 pode-se visualizar o modelo do aparelho de medição utilizado nos experimentos.

Figura 25 - Rugosímetro digital.



Fonte: Homis (2017).

O comprimento da amostragem (cutoff) foi de 0.8 mm e sua velocidade de medição de 0.5 mm/s. Para o comprimento da avaliação foi escolhido o valor 5, que multiplicado pelo cutoff equivale ao comprimento de medição de 4 mm. A norma

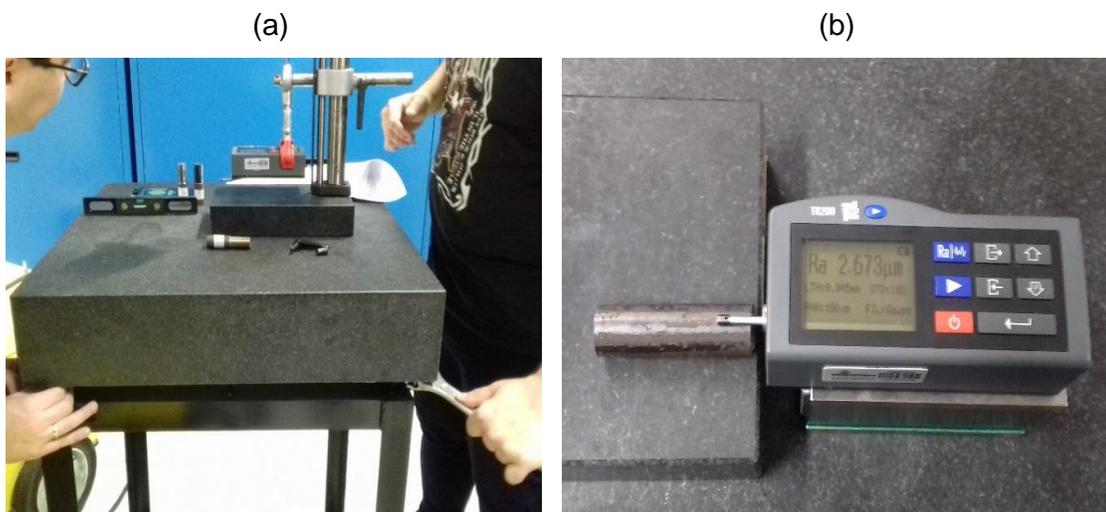
adotada foi a ISO 4287 (Internacional Standard) e como parâmetro de medição foi utilizado a rugosidade média, conhecida como Ra.

Além da seleção dos parâmetros citados acima, também foram feitos outros ajustes na configuração do aparelho para proporcionar a correta medição. O princípio de medição é feito por método indutivo, na qual a escala de medição é de 160  $\mu\text{m}$ , o raio do apalpador é de 2  $\mu\text{m}$ , o material do apalpador é de diamante e seu ângulo de fixação de 45 mm. A precisão de medição pertence a faixa de +/- 10% e a repetibilidade menor ou igual a 6%.

Na realização das medições houveram algumas dificuldades devido à superfície analisada ser de forma cilíndrica, necessitando a regulagem da mesa e uma adaptação em um suporte, de modo a viabilizar a coleta de dados.

Na Figura 26 pode-se observar alguns procedimentos que foram feitos para para balancear a mesa de suporte, evitando dessa forma possíveis erros de medição devido ao desnível do equipamento.

Figura 26 – (a) Nivelamento da mesa de medição e (b) Nivelamento do equipamento.



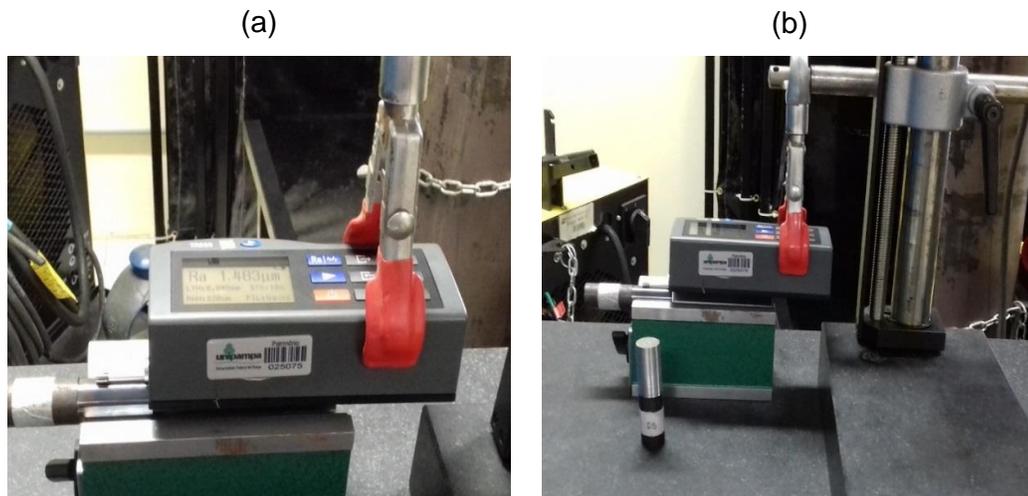
Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 27 é possível visualizar alguns equipamentos disponíveis em laboratório que foram adaptados, tornando possível a coleta dos resultados de forma eficaz.

Foram feitas quatro medidas de cada corpo de prova, na qual cada medida foi realizada a 90°, totalizando 360° da superfície cilíndrica, para evitar possíveis

discrepâncias nas medições de teste. Na sequência foram feitas as análises desses dados obtidos e feito uma média dos valores.

Figura 27 – (a) Adaptação dos suportes para prender o rugosímetro e (b) Realização das medições.

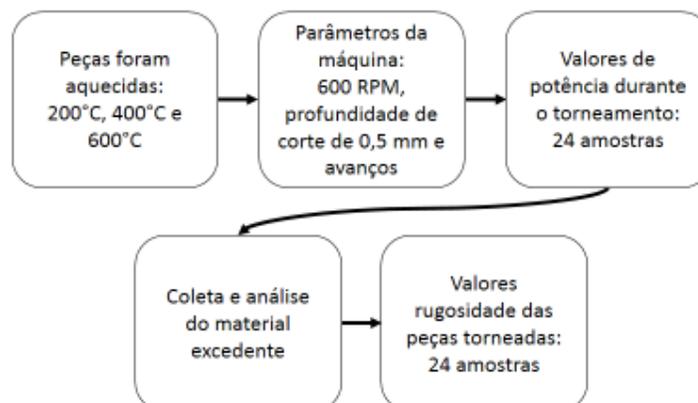


Fonte: Próprio Autor.

#### 4.3 Procedimento e Parâmetros Adotados no Experimento

Os parâmetros adotados durante os experimentos foram escolhidos com base na literatura disponível nos mais diversos canais de pesquisa e também contou com a experiência de professores e técnicos dos laboratórios. A sequência das etapas pode ser vista na Figura 28.

Figura 28 – A sequência das etapas que foram feitas no laboratório.



Fonte: Próprio Autor.

As temperaturas de trabalho adotadas são de: temperatura ambiente (variando entre 18°C a 22°C), 200°C, 400°C e 600°C. Essa grande variação de temperatura foi adotada de forma proposital, no intuito de gerar resultados discrepantes em cada fase. No forno as peças foram aquecidas 200°C acima do valor desejado, de forma que a perda de calor que ocorreu no transporte da peça até o torno, não resultou em temperaturas menores que a estabelecida. O tempo que as amostras ficaram no forno foi de cerca de uma hora e trinta minutos, e as últimas amostras torneadas foi a temperatura de 600°C.

A rotação do eixo da máquina-torno foi constante de 600 RPM e houve duas variações nos avanços de corte de: 0.05 mm/volta e 0.2 mm/volta. A profundidade de corte foi mantida constante para o processo em 0,5 mm.

Foram obtidos 24 resultados durante os ensaios, sendo estes divididos em dois diferentes grupos que podem ser analisados na Tabela 7.

Tabela 6 – Combinações das amostras.

AMOSTRAS				
	Temperatura Ambiente	200°C	400°C	600°C
0,05 mm/volta	3	3	3	3
0,2 mm/volta	3	3	3	3

Fonte: Próprio Autor.

As peças foram colocadas no forno para aquecê-las, otimizando o tempo de espera, pois as resistências têm um elevado tempo de aquecimento. Após estas atingirem a temperatura ideal foram retiradas e presas ao torno mecânico. O controle de temperatura foi feito com um pirômetro durante todo o processo, desde a retirada do forno, até o término do desbaste.

Durante o torneamento, foram anotados os valores apresentados pelo wattímetro, quanto ao gasto de potência fornecida ao motor do torno. Também foram coletados os materiais excedentes para uma posterior análise quanto a sua forma e dimensão.

A pastilha, ou inserto, utilizada no desbaste da peça foi de geometria triangular, para desbaste em aço e ferro fundido, da empresa Iscar, com denominação de

Pastilha Super TNMG1, modelo 80408-GN. Após o torneamento não foi feita uma verificação do desgaste ocorrido nessa ferramenta de corte.

Para a análise dos resultados, foi feito uso do software Minitab17 que é voltado para análises estatísticas, possibilitando a validação dos testes laboratoriais com um elevado índice de confiabilidade.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos experimentos foram obtidos diversos resultados no processo de torneamento a quente, sendo essa etapa dividida em sub itens para facilitar a compreensão das análises críticas.

### 5.1 Consumo de Potência

Nos ensaios realizados houve uma significativa diferença no consumo de potência relacionado as variações de temperatura. Nesse tópico serão mostrados os diferentes valores obtidos nos experimentos com os cálculos baseados na literatura.

A velocidade de corte utilizada no procedimento foi feita com base na bibliografia presente e calculou-se pela equação (3) da seguinte forma:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 19.600}{1000} = 35,81 \text{ m/min}$$

Esse valor de velocidade angular, ou rotacional, foi adotado para não sobrecarregar o torno em esforços quando este estiver em funcionamento. O valor encontrado para área da seção de corte pode ser calculado pela equação (5) como:

$$A = b \cdot h = a_p \cdot f = 0,5 \cdot f$$

$$A_1 = a_p \cdot f_1 = 0,5 \cdot 0,2 = 0,1 \text{ mm}^2 \quad A_2 = a_p \cdot f_2 = 0,5 \cdot 0,05 = 0,025 \text{ mm}^2$$

Com base em tabelas do aço carbono ABNT 1045, pode-se verificar condições de usinagem e a pressão específica de corte ( $K_s$ ) quanto ao acabamento e ao desbaste. Na Figura 28 é possível observar valor de  $K_s$  ( $K_c$ ) para alguns materiais segundo a norma alemã AWF-158.

Figura 29 – Valores orientativos das pressões específicas de corte (AWF-158).

MATERIAIS	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ] (ou dureza)	kc [N/mm <sup>2</sup> ]			
		Avanço em [mm/rot]			
		0,1	0,2	0,4	0,8
ST3411, St3711, St4211 (ABNT 1015 a 1025)	até 500	3600	2600	1900	1360
ST5011 (ABNT 1030 a 1035)	500 a 600	4000	2900	2100	1520
STR6011 (ABNT 1040 a 1045)	600 a 700	4200	3000	2200	1560
ST7011 (ABNT 1060)	700 a 850	4400	3150	2300	1640
ST 85 (ABNT 1095)	850 a 1000	4600	3300	2400	1720
Aço fundido	300 a 350	3200	2300	1700	1240
	500 a 700	3600	2600	1900	1360
	> 700	3900	2850	2050	1500
Aço Mn, aços Cr-Ni, aços Cr-Mo e outros aços ligados	700 a 850	4700	3400	2450	1760
	850 a 1000	5000	3600	2600	1850

Fonte: Adaptado Borges (2017).

Dessa forma, é possível calcular a força de corte necessária para valores de acabamento da usinagem do aço, tendo em vista a figura acima. Para o cálculo da força no avanço de 0.2 mm/volta foi utilizado o  $K_s$  de 3000 N/mm<sup>2</sup>. Como o avanço de 0.05 mm/volta não está descrito na Figura 28, adotou-se um valor de aproximação de 5600 N/mm<sup>2</sup>, permitindo calcular os valores das forças de corte para as duas velocidades de avanço pela equação (4) como:

$$F_c = K_s \cdot A$$

$$F_{c1} = 3000 \cdot 0,1 = 207 = 300 \text{ N} \quad F_{c2} = 5600 \cdot 0,025 = 140 \text{ N}$$

O valor adotado para a pressão específica de corte foi com base na literatura existente, podendo este variar de acordo com o tipo de material que constitui a peça a ser trabalhada. Por se tratar de uma máquina operatriz convencional, foi desprezada as equações da força de avanço e a potência fornecida pelo motor pode ser calculada pela equação (7) como:

$$P_C = \frac{F_c \cdot v_c}{6,0 \times 10^4} \text{ [kW]}$$

$$P_{C1} = \frac{300.35,81}{6,0 \times 10^4} = 179,05 \text{ W} \quad P_{C2} = \frac{140.35,81}{6,0 \times 10^4} = 83,55 \text{ W}$$

$$P_m = \frac{P_C}{\eta}$$

$$P_{m1} = \frac{179,05}{0,65} = 275,46 \text{ W} \quad P_{m2} = \frac{83,55}{0,65} = 128,54 \text{ W}$$

Foi adotado o valor de rendimento com base em uma máquina operatriz convencional, e os valores obtidos nos cálculos da potência fornecida pelo motor evidenciam um maior consumo para a maior velocidade de avanço, de 0.2 mm/volta, sendo o dobro da potência consumida no avanço de 0.05 mm/volta.

Na equação (13) é calculado o consumo realizado pela máquina operatriz durante o desbaste, na qual foi utilizada as médias das potências na temperatura ambiente subtraindo-se 50 Watts de potência (valor obtido com a máquina ligada sem estar torneando) e multiplicando esse valor por três (corrente trifásica):

$$P_{\text{TeóricaMáquina}} = (\text{MédPot}[20^\circ\text{C}] - 50\text{W}). 3 \quad \dots(13)$$

Dessa forma, é possível realizar o cálculo da potência consumida pela máquina como:

$$\begin{aligned} P_{\text{Máquina}[\frac{0,2\text{mm}}{\text{volta}}]} &= (135,0 - 50). 3 & P_{\text{Máquina}[\frac{0,05\text{mm}}{\text{volta}}]} &= (98,33 - 50). 3 \\ &= 255 \text{ W} & &= 145 \text{ W} \end{aligned}$$

Após os cálculos do consumo teórico de potência fornecida para o torno mecânico, é possível observar que os valores foram aproximados aos obtidos no torneamento a temperatura ambiente, validando dessa forma os resultados encontrados nos ensaios do laboratório.

### Consumo Potência Avanço de 0.05 mm/volta e 0.2 mm/volta

Na Tabela 8 pode-se observar os valores encontrados para a potência média e o desvio padrão para os avanços de 0.05 e 0.2 mm/volta, a uma profundidade de corte constante de 0.5 mm, com quatro variações de temperatura. A peça foi torneada a uma velocidade de corte referente a rotação 600 RPM utilizada.

Tabela 7 - Dados referentes a potência sob o avanço de 0.05 mm/volta e 0.2 mm/volta relacionado a variação de temperatura.

Ensaio	T [°C]	Média Potência à 0,05 mm/volta [W]	Desvio Padrão	Média Potência à 0,2 mm/volta [W]	Desvio Padrão
1	20				
2	20	98,33	2,357	135,0	0
3	20				
4	200				
5	200	79,16	1,178	96,66	6,236
6	200				
7	400				
8	400	80,83	4,249	101,66	10,274
9	400				
10	600				
11	600	83,33	3,118	81,66	6,236
12	600				

Fonte: Próprio Autor.

O modelamento adotado foi através de uma superfície de resposta de terceira ordem, a qual melhor representa a relação do consumo de potência do torno mecânico com a temperatura dos experimentos.

Através do software Minitab 17, foi verificada a Análise de Variância (ANOVA), apresentada na Tabela 9, na qual é observada uma confiabilidade relativamente grande que o parâmetro mais significativo sobre os resultados é a temperatura, sendo seguido pelo avanço adotado no experimento. O erro possui um valor maior que 10%, sendo o erro puro no valor de 8.26%.

Tabela 8 – ANOVA para potência nos avanços de 0,2 mm/volta e 0.05 mm/volta.

Fonte	Análise de Variância						
	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F	P
Regressão	6	7084,58	89,44%	7084,58	1180,76	24	0
Avanço [mm/volta]	1	2016,67	25,46%	1526,69	1526,69	31	0
Temperatura [°C]	1	2860,61	36,12%	836,98	836,98	17	0,001
Temperatura [°C]*Temperatura [°C]	1	616,22	7,78%	816,44	816,44	16,6	0,001
Avanço [mm/volta]*Temperatura [°C]	1	929,16	11,73%	39,75	39,75	0,81	0,381
Temperatura [°C]*Temperatura [°C]*Temperatura [°C]	1	658,58	8,31%	658,58	658,58	13,4	0,002
Avanço [mm/volta]*Temperatura [°C]*Temperatura [°C]	1	3,34	0,04%	3,34	3,34	0,07	0,798
Erro	17	836,25	10,56%	836,25	49,19		
Falta de ajuste	1	182,09	2,30%	182,09	182,09	4,45	0,051
Erro Puro	16	654,17	8,26%	654,17	40,89		
Total	23	7920,83	100,00%				

Fonte: Próprio Autor.

A equação utilizada para o cálculo da regressão que melhor apresentou resultados foi de 3ª ordem vista pela equação (14):

$$Potência[W] = 94,39 + 232,2 * f - 0,3221 * Temp + 0,001139 * Temp * Temp - 0,299 * f * Temp - 0,000001 * Temp^3 - 0,000134 * f * Temp^2 \quad \dots(14)$$

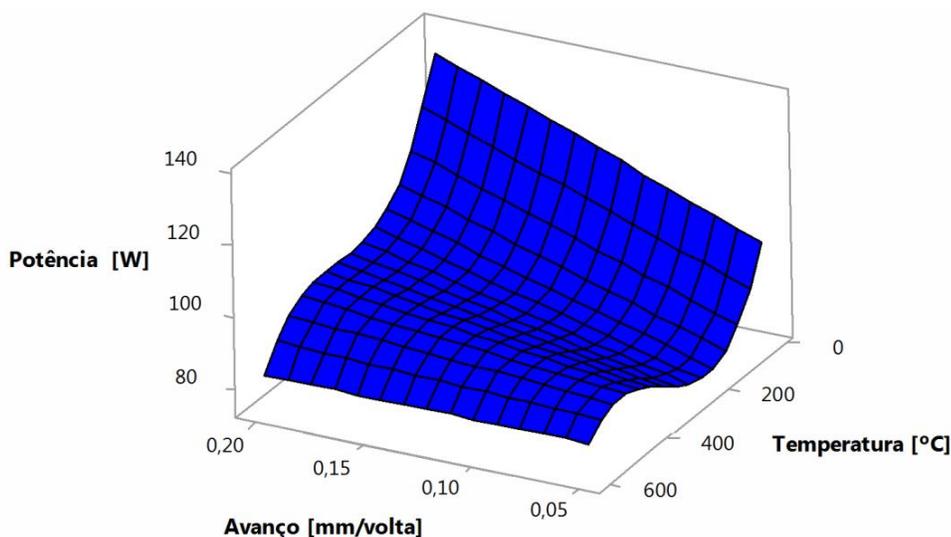
Como resumo do modelo tem-se:

S	R <sup>2</sup>	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
7,01366	<b>89,44%</b>	85,72%	1596,11	79,85%

Para obter a superfície de resposta dos parâmetros adotados, foi estabelecido uma relação entre os avanços, a temperatura e potência consumida durante o torneamento, ilustrado na Figura 29.

Através da Figura 29, pode-se notar que os melhores desempenhos ocorreram a temperatura de 200°C com avanço de 0.05 mm/volta, pois apresentou o menor consumo de potência específica da máquina operatriz. Em contra partida, o pior resultado foi encontrado a temperatura ambiente com avanço de 0.2 mm/volta, na qual o consumo de potência foi cerca de 130 Watts.

Figura 30 – Superfície de resposta da potência consumida.



Fonte: Próprio Autor.

A medida que a velocidade de avanço diminui foram encontrados melhores valores no consumo de energia. Os resultados não foram lineares, sendo que a temperatura de 600°C os valores para consumo de potência foram maiores que para 400°C e 200°C de temperatura.

A temperatura ambiente apresentou os maiores coeficientes de consumo de potência no desgaste da peça, sendo diretamente proporcional ao aumento da velocidade de avanço.

De acordo com Mello et al (2002), para essas condições de usinagem, o aquecimento reduz a potência consumida, tornando possível a remoção de mais material para mesmos valores de potência. Conforme Spinelli Jr. (2004), o aquecimento das peças pelas resistências elétricas, associado ao calor gerado durante o corte, diminui a resistência de cisalhamento nos planos principal e secundário, justificando a diminuição das forças de usinagem. No estudo de Tosun e Ozler (2004), no processo de torneamento a quente a melhor performance foi obtida com a velocidade de corte de 22 m/min, profundidade de 0.5 mm, avanço de 0.1 mm/volta e temperatura de trabalho de 600°C.

Os resultados obtidos nesse estudo estão de acordo com os autores acima, no qual o aço aquecido por fontes externas de calor apresenta melhores resultados de desempenho sob diferentes condições de torneamento.

## 5.2 Rugosidade Superficial

Nessa etapa do estudo, para obter os dados da rugosidade superficial, foram feitas quatro medições realizadas a cada 90° na superfície cilíndrica da peça torneada. Os valores representados na Tabela 10 representam as médias das medições.

### Rugosidade Superficial para Avanço de 0.05 mm/volta e 0.2 mm/volta

Na Tabela 10 pode-se observar os valores encontrados para velocidade de avanço de 0.2 e 0.05 mm/volta, para média da rugosidade superficial e o desvio padrão nos ensaios de laboratório.

Tabela 9 - Dados referentes a rugosidade média relacionada com a variação de temperatura e ao avanço de corte de 0.05 e 0.2 mm/volta.

Ensaio	T [°C]	Média Rugosidade à 0,2 mm/volta [μm]	Desvio Padrão	Média Rugosidade à 0,05 mm/volta [μm]	Desvio Padrão
1	20				
2	20	1,717	0,079	3,127	0,170
3	20				
4	200				
5	200	1,256	0,030	1,201	0,669
6	200				
7	400				
8	400	1,600	0,189	5,144	0,296
9	400				
10	600				
11	600	1,400	0,032	2,910	0,335
12	600				

Fonte: Próprio Autor.

O modelamento da rugosidade da superfície de resposta foi de terceira ordem, com relação a temperatura dos experimentos. Através do software Minitab 17, foi verificada a Análise de Variância apresentada na Tabela 11, na qual é observada uma confiabilidade de 74.41% que o parâmetro com maior influência sobre os resultados é o avanço adotado.

Tabela 10 – ANOVA para rugosidade superficial nos avanços de 0,2 mm/volta e 0.05 mm/volta.

Fonte	Análise de Variância						
	DF	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F	P
Regressão	6	30,817	74,41%	30,817	5,1362	8,24	0
Avanço [mm/volta]	1	15,4032	37,19%	0,6433	0,6433	1,03	0,32
Temperatura [°C]	1	0,5966	1,44%	5,5084	5,5084	8,84	0,01
Temperatura [°C]*Temperatura [°C]	1	0,0319	0,08%	11,4668	11,4668	18,4	0
Avanço [mm/volta]*Temperatura [°C]	1	1,188	2,87%	0,5634	0,5634	0,9	0,36
Temperatura [°C]*Temperatura [°C]*Temperatura [°C]	1	13,3675	32,28%	13,3675	13,3675	21,5	0
Avanço [mm/volta]*Temperatura [°C]*Temperatura [°C]	1	0,2296	0,55%	0,2296	0,2296	0,37	0,55
Erro	17	10,5954	25,59%	10,5954	0,6233		
Falta de ajuste	1	8,428	20,35%	8,428	8,428	62,2	0
Erro Puro	16	2,1674	5,23%	2,1674	0,1355		
Total	23	41,4124	100,00%				

Fonte: Próprio Autor.

A análise da tabela apresenta altos valores para erros, a equação de terceiro grau utilizada para a obtenção dos resultados pode ser descrita pela equação (15) como:

$$Rugosidade [\mu m] = 3,575 - 4,77 * f - 0,02613 * Temp + 0,000135 * Temp * Temp - 0,0356 * f * Temp - 0,0000 * Temp * Temp * Temp + 0,000035 * f * Temp * Temp \dots(15)$$

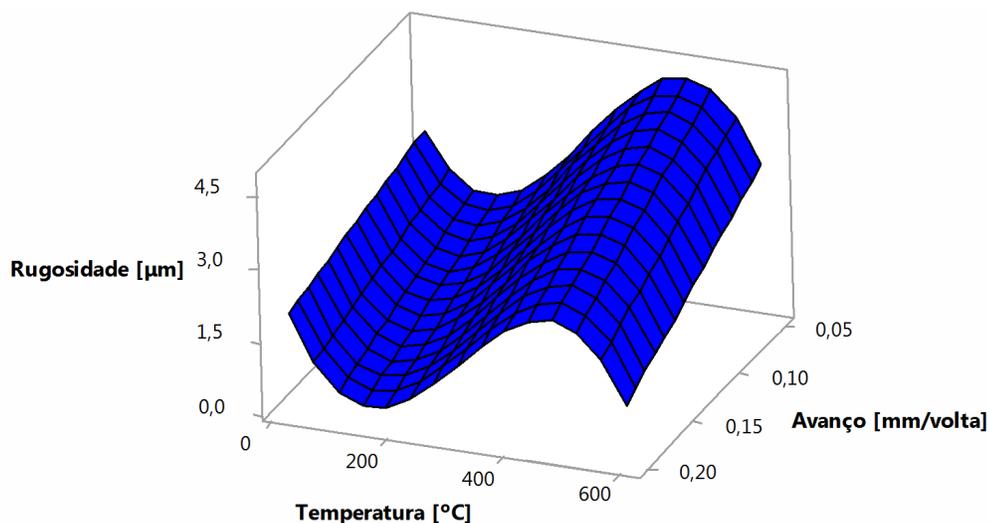
Como resumo do modelo tem-se:

S	R <sup>2</sup>	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0,789468	74,41%	65,38%	19,7690	52,26%

O R<sup>2</sup> do resumo do modelo não chegou a 90%, ou seja, não tem uma boa confiabilidade a equação. Tentou-se outros modelos de ordens superiores; no entanto, mesmo assim não se chegou a valores desejados.

Para obter a superfície de resposta da rugosidade superficial, foi estabelecido uma relação entre os avanços, a temperatura e rugosidade durante o torneamento a quente, ilustrado na Figura 30.

Figura 31 – Superfície de resposta da rugosidade superficial.



Fonte: Próprio Autor.

Com a Figura 30 pode-se observar uma não linearidade da curva da rugosidade superficial. Pode-se notar que os melhores valores encontrados para rugosidade é a temperatura de 200 $^{\circ}\text{C}$  de aquecimento com avanço de 0,05  $\text{mm/volta}$ . Os piores desempenhos são vistos na temperatura de 400 $^{\circ}\text{C}$  sob avanço de 0,05  $\text{mm/volta}$ , resultado este pode ser devido ao possível amolecimento da superfície metálica em altas temperaturas de desgaste.

Fica evidenciada uma similaridade quanto aos valores de rugosidade sob a condição de avanço de 0,2  $\text{mm/volta}$ , sendo a média de 1,493  $\mu\text{m}$  de rugosidade. Já as condições do acabamento superficial sob o avanço de 0,05  $\text{mm/volta}$ , apresentaram uma extrema variação em seus resultados, sendo encontrado o melhor resultado do processo a 200 $^{\circ}\text{C}$  e o pior a 400 $^{\circ}\text{C}$  de temperatura.

No estudo de Tosun e Ozler (2004), sob as condições de 22  $\text{m/min}$ , profundidade de 0,5  $\text{mm}$  e avanço de 0,1  $\text{mm/volta}$  a 600 $^{\circ}\text{C}$ , a vida útil da ferramenta de corte aumentou 2,45 vezes e a rugosidade superficial diminuiu 2,34 vezes, esses resultados validaram o método de Taguchi. De acordo com os resultados de Spinelli Jr., Sanches e Mello (2003), foi percebido que não houve alterações macroestruturais significativas e melhora na rugosidade quando as peças submetidas a centenas de graus acima da temperatura ambiente por fontes externas de calor, se comparado ao processo de usinagem convencional.

Com base nos autores acima, é possível ressaltar uma melhora da rugosidade superficial; entretanto, no presente estudo os melhores valores encontrados ocorrem na temperatura de 200°C para os dois avanços. Após a realização dos experimentos não foi feita uma análise da vida da ferramenta da ferramenta de corte.

### 5.3 Geração de Cavaco

A geração de cavaco na usinagem tem grande importância no processo; de acordo com Machado et al. (2009), estes podem ser contínuos, descontínuos e segmentados, sendo os contínuos da usinagem de materiais dúcteis e os descontínuos de materiais frágeis.

#### Cavacos com avanço de 0.2 mm/volta

Na etapa foram feitas diversas análises sobre os tipos de formas de material que foram obtidos durante o torneamento. Na Figura 31 pode-se observar o perfil do material retirado no avanço de 0.2 mm/volta para temperatura ambiente e para temperatura de 200°C.

Figura 32 – (a) Temperatura ambiente e (b) na temperatura de 200°C.



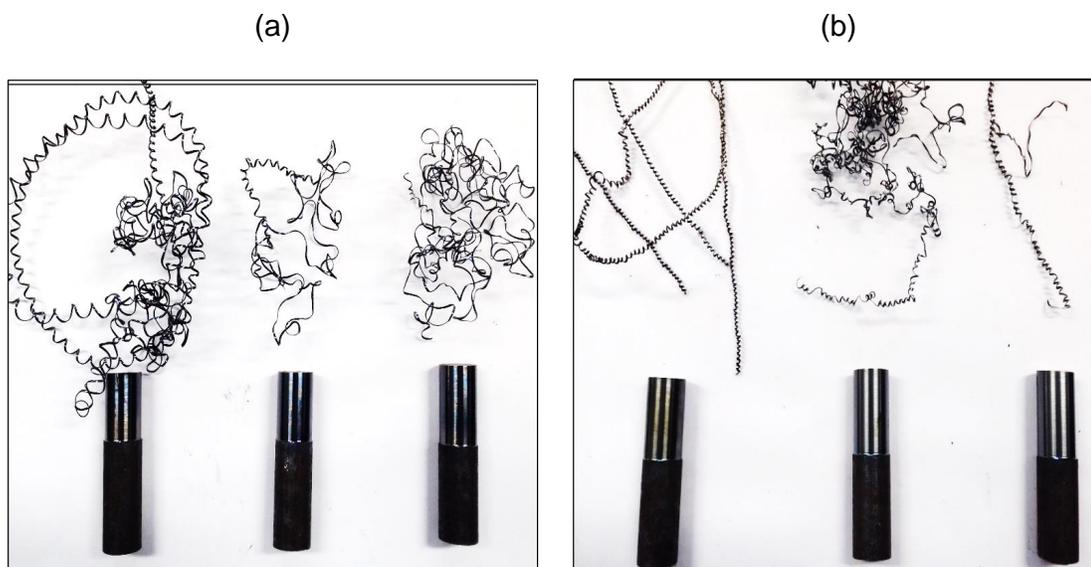
Fonte: Próprio Autor.

Na temperatura de 200°C o material apresentou um aspecto de pequenas lascas, enquanto que em temperatura ambiente a forma obtida foram de cavacos helicoidais relativamente longos.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2010), as formas de cavaco podem ser em fita, helicoidais, espiral e em lascas, sendo preferível a última forma quando há pouco espaço disponível, ou quando o cavaco deve ser removido por fluido refrigerante em furação profunda.

Na Figura 32 pode-se observar a geração de cavaco com a peça sendo trabalhada uma temperatura de 400°C e ao lado os cavacos gerados a uma temperatura de 600°C a um avanço de 0.2 milímetros por volta.

Figura 33 – (a) Cavacos gerados com a peça a uma temperatura de 400°C e (b) para uma temperatura de 600°C.



Fonte: Próprio Autor.

Na temperatura de 400°C nota-se a predominância dos cavacos em forma de fita e na temperatura de 600°C a predominância de cavacos helicoidais. De acordo com Souza (2011), o cavaco contínuo é o mais desejável do ponto de vista do acabamento da superfície da peça, vida da ferramenta, energia consumida no processo, pois este desliza de forma suave sobre a superfície da ferramenta. Após essas etapas dos experimentos não foi feito uma avaliação da macroestrutura no material após a usinagem.

### Cavacos com avanço de 0.05 mm/volta

Na Figura 33 pode ser observado na temperatura ambiente a geração de cavacos mistos e na temperatura de 200°C cavacos contínuos em forma de fita, já na Figura 34 é possível denotar a geração de cavacos contínuos durante o processo de torneamento a quente no avanço de 0.05 mm/volta.

Figura 34 – (a) Geração de cavacos a temperatura ambiente e (b) a temperatura de 200°C.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 35 – (a) Geração de cavacos a temperatura de 400°C e (b) a temperatura de 600°C.

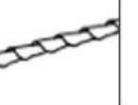
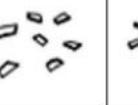
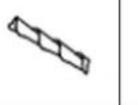
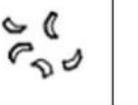


Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 35 é possível ver uma classificação detalhada das formas de cavaco que podem ser geradas durante a usinagem, possuindo oito subdivisões em suas classificações:

- Cavaco em fita: longo, curto e emaranhado;
- Cavaco tubular: longo, curto e emaranhado;
- Cavaco espiral: plano e cônico;
- Cavaco tipo arruela: longo, curto e emaranhado;
- Cavaco helicoidal cônico: longo, curto e emaranhado;
- Cavaco em arco: conectado e solto;
- Cavaco fragmentado;
- Cavaco tipo agulha.

Figura 35 – Classificação detalhada da forma dos cavacos segundo a norma ISO 3685.

1 - Cavaco em fita	2 - Cavaco tubular	3 - Cavaco espiral	4 - Cavaco hel. tipo arruela	5 - Cavaco hel. cônico	6 - Cavaco em arco	7 - Cavaco fragmentado	8 - Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3 - Emaranhado	2-3 - Emaranhado		4-3 - Emaranhado	5-3 - Emaranhado			

Fonte: Vanat e Braghini, 2014.

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, os melhores resultados encontrados no avanço de 0.2 mm/volta estão na temperatura de 200°C, visto que apresentou as formas de helicoidais curtos e fragmentado. No avanço de 0.05 mm/volta os melhores dados foram obtidos na temperatura ambiente e de 600°C, apresentando formas de cavaco helicoidais de comprimento curto.

## 6 CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho foi verificar o comportamento de alguns parâmetros no processo de usinagem, como o consumo de potência de corte, rugosidade superficial e geração de cavacos.

Depois de concluídos todos os experimentos de torneamento a quente e realizadas as devidas análises dos resultados, é possível tirar algumas conclusões com relação ao método de aquecimento da amostra antes da usinagem.

### 1. Consumo de Potência:

- Nos cálculos de potência teórica consumida pelo torno mecânico foram encontrados valores semelhantes aos encontrados no torneamento a temperatura ambiente, sendo estes: no avanço de 0.2 mm/volta a potência teórica foi de 275.46 W, enquanto que a potência utilizada durante o processo foi de 255 W; no avanço de 0.05 mm/volta a potência teórica foi 128.54 W e a potência do processo foi de 145 W. Essa aproximação de resultados torna o experimento válido com base nos estudos teóricos da bibliografia existente;
- No avanço de 0.2 mm/volta o menor consumo de potência específica foi visto na temperatura de 600°C;
- No avanço de 0.05 mm/volta os melhores resultados foram obtidos na temperatura de 200°C, sendo os melhores resultados médios do consumo de potência da máquina operatriz.

### 2. Rugosidade Superficial

- No avanço de 0.2 mm/volta a melhor medida de rugosidade superficial foi encontrada na temperatura de 200°C;
- No avanço de 0.05 mm/volta as melhores condições apresentadas pela superfície trabalhada são vistas na temperatura de 200°C, sendo neste avanço o melhor resultado médio encontrado.

### 3. Geração de Cavaco

- No avanço de 0.2 mm/volta as melhores formas de cavaco levando em consideração pouco espaço disponível, foram na temperatura de 200°C;

- No avanço de 0.05 mm/volta não foi obtido nenhuma forma de cavaco ideal; porém, os melhores resultados encontrados foram nas temperaturas ambiente e de 600°C.

Dessa forma, é possível concluir que para as condições de avanço de 0.05 mm/volta e temperatura de 200°C encontrou-se os melhores valores no consumo de potência e acabamento da superfície.

E para a geração de cavaco as melhores condições ocorreram no avanço de 0.2 mm/volta a 200°C de temperatura.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de tema para trabalhos futuros:

- a) Uma análise do comportamento do material, quanto a sua micrografia ou modificação em sua estrutura constituinte básica, quando este submetido a elevadas temperaturas de aquecimento antes do processo de usinagem;
- b) Estudo relacionado aos possíveis tratamentos térmicos sofridos pelas amostras durante o processo de torneamento a quente;
- c) Aplicação deste tipo de procedimento de aquecimento a outros tipos de materiais de modo a tornar possível a comparação dos comportamentos a determinadas temperaturas, de modo a verificar: a forma de cavaco originada, o consumo de potência específica, a rugosidade superficial e a usinabilidade desse material;
- d) Estudo aprofundado sobre o desgaste e vida da ferramenta de corte utilizada na retirada de material, como também o material utilizado em sua fabricação;
- e) Aplicação de fluidos de corte no processo;
- f) Geometria da ferramenta de corte, relacionando fatores como força e potência de corte;
- g) Custos decorrentes da aplicação de fontes externas de calor para aquecimento do material.

## REFERÊNCIAS

AMORIM, H. J. **Estudo da Relação entre Velocidade de Corte, Desgaste de Ferramenta, Rugosidade e Forças de Usinagem em Torneamento com Ferramenta de Metal Duro**. 2002. 131 p. Dissertação de Mestrado (Mecânica dos sólidos) – URGs, Porto Alegre.

BORGES, J. B. **Módulo III: usinagem básica**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina – CEFET/SC, Unidade de Araranguá. Disponível em: < [www.ebah.com.br](http://www.ebah.com.br)>. Acessado em 18 de Junho de 2017.

CLARK, Machine. **Torno Mecânico de Bancada modelo BV20**. Disponível em: <<http://clarkmachine.com.br/Produto/VPProduto2/Torno%20Mec%C3%A2nico%20de%20Bancada%20Clark%20modelo%20BV20?id=7>>. Acessado em 08 de Junho de 2017.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Editora Artliber, 2010.

DORÉ, C. **Influência da Variação da Nodularidade na Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular**. 2007. 131p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica, Fabricação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DOTTO, A. R. **Influência das Condições de Usinagem por Torneamento na Rugosidade da Peça**. 9p. 4º Semana Internacional de Engenharia e Economia FAHOR. Horizontina – RS, 2014.

ELETROTHERMO, Resistências Infravermelho em Cerâmica. Disponível em: < <http://eletrothermo.com.br/resistencias-infravermelho-em-ceramica/>>. Acessado em 16 de Junho de 2017.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Editora Blucher, 1970.

FORTEL. **Cortadora Metalográfica (80 mm ou 100 mm), CFIII**. Disponível em: <<https://fortel.com.br/produtos/detalhes-produtos/cortadora-metalografica-80mm-ou-100mm>>. Acessado em 08 de Junho de 2017.

GOSAI, M.; BHAVSAR, S. N. Experimental Study on Temperature Measurement in Turning Operation of Hardened Steel (EN36). **Science Direct**. Gujarat, India. 2016. *Procedia Technology* 23 (2016) 311-318.

HOMIS, Homis do Brasil. Disponível em: <<https://www.homis.com.br/outros/rugosimetro-digital-portatil-tr-200-time>>. Acessado em 10 de Junho de 2017.

MACHADO, A. R. SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais**. 8º edição. Uberlândia: Editora da Universidade de Uberlândia, 2004. 262p.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2009.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2º edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2011.

MELLO, H. J. **Investigação da Operação de Torneamento a Quente Utilizando Resistência Elétrica em Quartzo**. 10p. 2º CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. João Pessoa – PB, 2002.

NASCIMENTO, G.; ABRÃO, A. M. **Influência da Geometria da Ferramenta de Corte na Usinabilidade do Aço ABNT 1045**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2000, Natal – RN, UFRN.

RANGANATHAN, S.; SENTHILVELAN, T. OPTMIZING THE PROCESS PARAMETERS ON TOOL WEAR OF WC INSERT WHEN HOT TURNING OF AISI 316 STAINLESS STEEL. **ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences**. India, Jul. 2010. Vol. 5, NO. 7.

RODRIGUES, A. R. **Estudo da Geometria de Arestas de Corte Aplicadas em Usinagem com Altas Velocidades de Corte**. 2005. 249p. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

SANCHES, H. A. B. **Avaliação do Processo de Usinagem com Corte Interrompido Utilizando a Análise de Esforços e Frequências**. 2011. 123 p. Dissertação de Mestrado (Projeto e Fabricação) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2007.

SOUZA, A. J. **Processos de Fabricação por Usinagem: parte 1**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

SPINELLI JÚNIOR, A. J. **Análise do Processo de Torneamento a Quente Auxiliado por Resistência Elétrica de Quartzo**. 2004. Dissertação de Mestrado, UNESP-Campus Bauru, São Paulo.

SPINELLI JR., A. D.; SANCHEZ, L. E. A.; MELLO, H. J. Hot Machining: a review. COBEM. 17th International Congress of Mechanical Engineering, Novembro de 2003, São Paulo.

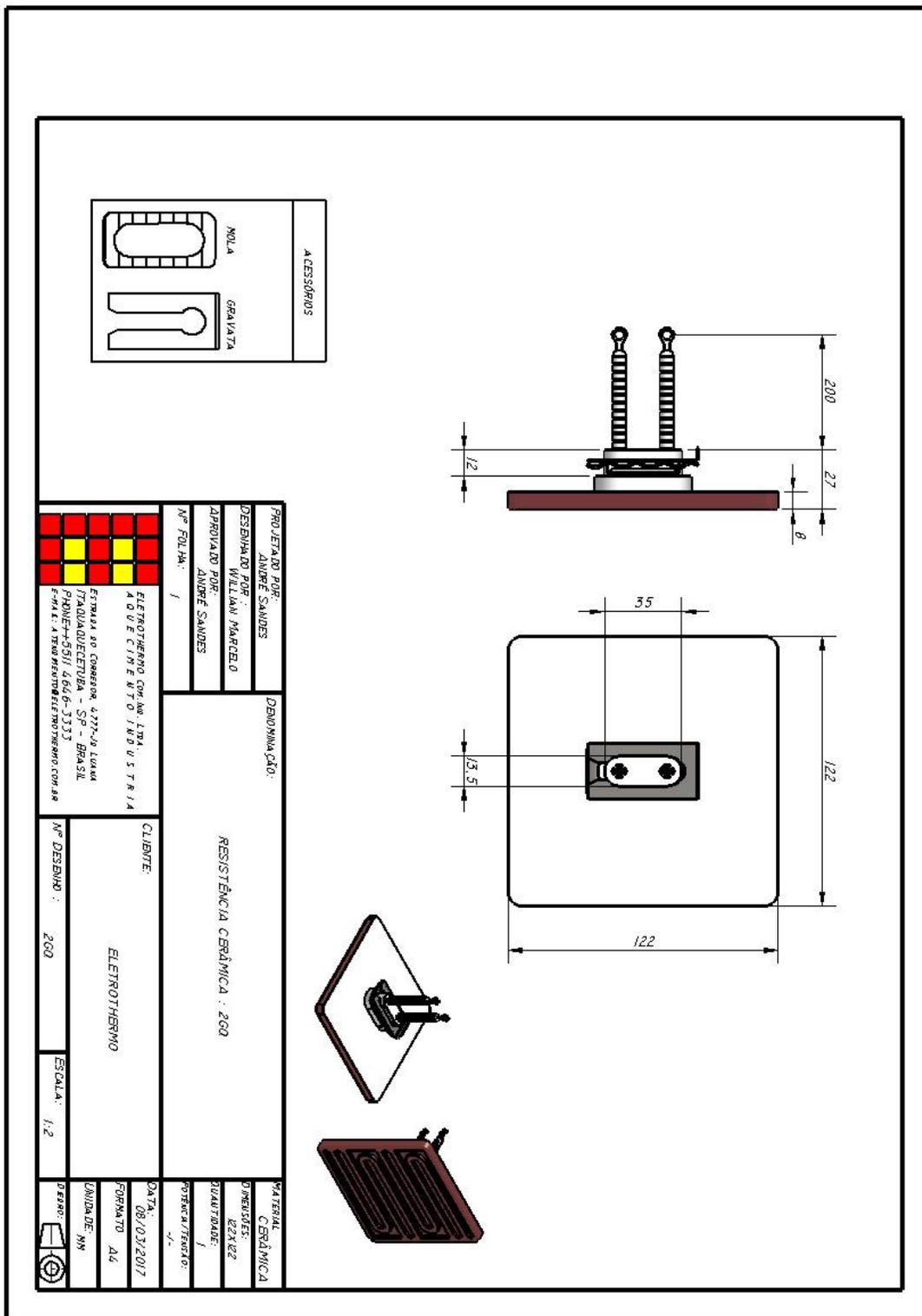
TOSUN, N.; OZLER, L. Optimisation for hot turning operations with multiple performance characteristics. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Editora Londres, 19 mar. 2004. Int J Adv Manuf Technol. (2004) 23: 777-782.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4ª edição. Woburn, Massachusetts: Editora Butterworth-Heinemann, 2000.

VANAT, K. J.; BRAGHINI JR., A. **O uso de ferramentas de metal duro no torneamento do nylon**. Revista Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 11, n. 1, p. 50-57, jan./mar. 2014.

ANEXOS

Figura 36 – Resistência infravermelho em cerâmica plana.



Fonte: Eletrothermo (2017).

